



ScuDo

Scuola di Dottorato ~ Doctoral School
WHAT YOU ARE, TAKES YOU FAR

Doctoral Dissertation
Doctoral Program in Mechanical Engineering (30th Cycle)

Generazione di manichini virtuali da dati antropometrici ed applicazioni con strumenti di modellazione umana virtuale

By

Raffaele Castellone

Supervisor(s):

prof.ssa Maria Pia Cavatorta, Supervisor
ing. Stefania Spada, Industrial Supervisor, FCA

Doctoral Examination Committee:

prof. Francesco Caputo, Referee, Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli
prof.ssa Margherita Micheletti Cremasco, Referee, Università degli Studi di Torino
prof. Davide Salvatore Paolino, Politecnico di Torino
dott.ssa Marta Petyx, Centro Ricerche Inail
prof. Nicola Vitiello, Scuola Superiore Sant'Anna

Politecnico di Torino
2018

Declaration

I hereby declare that, the contents and organization of this dissertation constitute my own original work and does not compromise in any way the rights of third parties, including those relating to the security of personal data.

Raffaele Castellone

2018

* This dissertation is presented in partial fulfillment of the requirements for **Ph.D. degree** in the Graduate School of Politecnico di Torino (ScuDo).

Abstract

Nell'ambito dello studio della funzionalità dell'uomo nel suo ambiente di lavoro, nonché nell'ottimizzazione dei suoi compiti e nella progettazione della sua postazione lavorativa, è ormai diventata una priorità l'utilizzo dell'ergonomia proattiva, atta a prevedere e gestire i cambiamenti e i problemi legati alla realtà dinamica del mondo industriale. Nasce, dunque, la necessità di fare uso di strumenti di Digital Human Modeling (DHM) capaci di prevedere e analizzare posture e fornire valutazioni ergonomiche, in tempi relativamente brevi, coerenti con le normative tecniche internazionali. Nella prima parte del lavoro è presentata una panoramica generale dei diversi strumenti di DHM e ne sono mostrate alcune applicazioni. In particolare, lo studio investiga sui punti di forza e le limitazioni di un modello multibody sviluppato nell'ambito di una collaborazione tra industria e accademia. Il modello, che risulta caratterizzato da un numero di gradi di libertà limitato, è stato posto a confronto con il riferimento della letteratura allo scopo di validarlo. I confronti si sono concentrati sugli angoli posturali di flessione del tronco ed elevazione del braccio, definiti in coerenza con le normative internazionali: ISO 11226:2000 e UNI EN 1005/4:2009. In seguito tale modello è stato utilizzato per la verifica di tre casi studio relativi a di postazioni di lavoro reali, evidenziandone l'utilità nella progettazione per diverse antropometrie dell'operatore. Gli angoli posturali calcolati nello studio di validazione sono stati usati per generare mappe posturali continue con diversi metodi di interpolazione. Le mappe posturali sono state normalizzate rispetto alle principali misure antropometriche, al fine di ottenere risultati generalizzabili a diverse antropometrie

dell'operatore. Nella seconda parte del lavoro, viene descritto il progetto: "La Fabbrica si Misura", sviluppato in collaborazione con Fiat Chrysler Automobiles (FCA) e l'Istituto Nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavoro (INAIL). Il progetto comprende la misurazione antropometrica di un campione di 3000 lavoratori per genere all'interno degli stabilimenti produttivi di FCA. La campagna di misurazione ha permesso la creazione di un database antropometrico di dati non aggregati che fornisce una fotografia aggiornata della popolazione lavorativa italiana. I dati raccolti sono stati analizzati statisticamente al fine di stimare i modelli antropometrici dei percentili a cui si riferisce la progettazione ed evidenziare differenze antropometriche significative dovute all'età e all'area geografica del campione. Tra le utilità e le applicazioni del database, è di particolare interesse la generazione di modelli antropometrici per aggiornare i manichini virtuali degli strumenti DHM. Nella terza e ultima parte della tesi, sono stati quindi utilizzati approcci diversi per ottenere modelli di manichini virtuali; modelli che sono stati confrontati per evidenziarne le differenze e guidarne la scelta nella valutazione e progettazione di postazioni di lavoro. Una stima affidabile delle misure antropometriche della popolazione lavorativa risulta di grande importanza in ottica "human-centred design" e potrà supportare la progettazione di postazioni di lavoro "adattabili" all'antropometria dei diversi lavoratori, così come indirizzare correttamente la progettazione di dispositivi indossabili protettivi o ausiliari quali gli esoscheletri.

Sommario

1. Premessa	1
Struttura della Tesi	8
2. Digital Human Modeling per l'ergonomia e la progettazione industriale	11
1.1 Introduzione.....	11
1.2 Confronto tra strumenti di Digital Human Modeling per prove di raggiungibilità	12
1.2.1 Descrizione dello studio.....	14
1.2.2 Risultati e discussioni	23
1.2.3 Conclusioni	33
1.3 Utilizzo dello HM nella progettazione	34
1.3.1 Descrizione dello studio.....	34
1.3.2 Risultati e discussioni	37
1.3.3 Conclusioni	42
1.4 Mappature di angoli posturali in un piano di raggiungibilità normalizzato	42
1.4.1 Descrizione dello studio.....	43
1.4.2 Risultati e discussioni	45
1.4.3 Conclusioni	52
3. Definizione e analisi di una banca dati antropometrica a supporto della progettazione.....	53
2.1 Introduzione.....	53
2.2 Materiali e metodi.....	55
2.2.1 Campionamento	56

2.2.2	Misure antropometriche	57
2.2.3	Strumento di misura	59
2.2.4	Procedura operativa di rilievo misure	60
2.2.5	Procedura per il controllo degli errori.....	62
2.3	Analisi statistiche e risultati.....	63
2.3.1	Database maschile.....	64
2.3.2	Database femminile	74
2.4	Altri risultati e discussioni antropometriche.....	83
2.4.1	Statura	84
2.4.2	BMI.....	87
4.	Generazione dei manichini virtuali.....	93
3.1	Introduzione.....	93
3.2	Tipologie di manichini virtuali	96
3.2.1	Manichini derivati da costanti di proporzionalità	97
3.2.2	Manichini derivati da banche dati.....	98
3.2.3	Manichini multivariati	101
3.3	Manichini con il database: “La Fabbrica si Misura”	105
3.3.1	Costanti di proporzionalità.....	105
3.3.2	Approccio percentile classico	106
3.3.3	Human Scale Standard (HSS).....	108
3.3.4	Confronti e discussioni	111
3.3.5	Analisi multivariata con la PCA	120
5.	Conclusioni generali	134
6.	Appendice	137
	Misure antropometriche.....	137
7.	Bibliografia	148

Premessa

L'industria è la parte dell'economia che produce beni materiali. Fin dall'inizio dell'industrializzazione, i salti tecnologici hanno portato a grandi cambiamenti sociali che hanno preso il nome di “rivoluzioni tecnologiche”:

- La prima rivoluzione industriale per la meccanizzazione
- La seconda rivoluzione industriale per l'uso intensivo dell'energia elettrica
- La terza rivoluzione industriale per la diffusione della digitalizzazione

La convergenza della produzione industriale con le tecnologie di informazione e comunicazione (ICT) è stata chiamata “Industry 4.0” (Industria 4.0), ed è uno degli argomenti più discussi da professionisti ed accademici del settore (Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B., 2016). Il termine Industria 4.0 è stato utilizzato per la prima volta in Germania nel 2011, quando il governo federale tedesco l'ha definita come iniziativa chiave nelle sue strategie tecnologiche (Kagermann, H., et al., 2013) ma, tutt'ora, la maggior parte delle industrie pianificano le proprie strategie nell'ottica di questo sviluppo tecnologico (Santos, C., et al., 2017).

La visione della produzione del futuro consiste in sistemi manifatturieri efficienti e scenari caratterizzati dal controllo del prodotto e del processo produttivo. In questa ottica, il termine Industria 4.0 è stato associato alla “quarta rivoluzione industriale” (Lasi, H., et al., 2014).

Il fascino di Industria 4.0 è duplice. Primo, poiché per la prima volta una rivoluzione industriale è stata prevista a priori e non osservata a posteriori e questo fornisce varie opportunità ad aziende e istituti di ricerca di pianificare attivamente il futuro. In secondo luogo, l'impatto economico di questa rivoluzione industriale è enorme, con il conseguente aumento di efficacia operativa e sviluppo di modelli, servizi e prodotti aziendali completamente innovativi.

Pur non esistendo una definizione comunemente accettata, l'Industria 4.0 viene generalmente considerata come un processo che culmina in una nuova concezione dell'industria, dallo sviluppo di nuovi prodotti e servizi, alla ricerca e innovazione, fino alla validazione e alla produzione, con un alto grado di automazione e interconnessione. L'aumento della digitalizzazione in tutti gli aspetti della produzione sta contribuendo all'incremento della quantità di dati e delle informazioni dell'industria stessa, con un conseguente aumento delle funzioni di supporto, di controllo e di analisi. L'interconnessione di tutti i servizi e i beni prodotti sta evolvendo verso ambienti completamente digitalizzati.

Due dei principi di progettazione su cui si basa l'Industria 4.0 sono:

- Interconnessione
- Trasparenza e gestione delle informazioni

Macchine, dispositivi, sensori e persone sono *interconnesse* tramite l'*Internet of Things* (Giusto, D., et al., 2010) e l'*Internet of People* (Vilarinho, T., et al., 2013), che formano l'*Internet of Everything* (De Santos, F. J. N., & Villalonga, S. G., 2015). Attraverso l'interconnessione di cose e persone è possibile condividere informazioni ed ottenere collaborazioni per raggiungere obiettivi comuni. Le collaborazioni possono essere di tre tipi: uomo-uomo, uomo-macchina e macchina-macchina. A partire dal numero crescente di oggetti e persone interconnessi, la fusione del mondo fisico e virtuale consente una nuova forma di *trasparenza e gestione delle informazioni*. Nel modello ideale dell'Industria 4.0, una copia virtuale del mondo fisico è creata attraverso i dati dei sensori collegati con i modelli degli stabilimenti digitalizzati, in modo da ottenere informazioni. Esempi di informazioni del mondo virtuale possono essere documenti elettronici, progetti e simulazioni virtuali, mentre esempi di informazioni del mondo fisico possono essere le posizioni o le condizioni di un certo macchinario o strumento di lavoro. L'analisi di queste informazioni permette di prendere le decisioni più appropriate per la gestione di un processo produttivo, anche in tempo reale.

I grandi produttori utilizzano la simulazione per supportare il processo decisionale per la progettazione e la produzione. Tuttavia, con il progresso dei fondamenti dell'Industria 4.0, le tecnologie e l'emergere di *big data*, la simulazione può essere utilizzata per eseguire e supportare le analisi dati e per ottenere guadagni di prestazioni. La fabbrica virtuale va oltre i tradizionali modelli di simulazione per includere funzionalità di modellazione multi-risoluzione, permettendo l'analisi a vari livelli di dettaglio (Jain, S., Shao, G., & Shin, S. J., 2017).

Il percorso di innovazione e creazione che si sta attraversando sfocia come primo punto nel *Digital Manufacturing* (DM), una dimensione produttiva rivoluzionaria, che entra a pieno titolo nello spettro d'azione della trasformazione digitale; con il termine *Digital Manufacturing* si intende un sistema integrato che serve a definire, ottimizzare e gestire un processo di lavorazione in ambiente virtuale.

Più precisamente, il DM consiste in una rappresentazione virtuale del sistema produttivo, svolta con *software* dedicati, in cui gli elementi che lo costituiscono riproducono la realtà, e mediante cui è possibile osservare il flusso dei materiali, valutare il *layout* ed identificare i più evidenti problemi e criticità del sistema progettato. È uno strumento potente, tramite cui diventa possibile simulare la fabbricazione e l'assemblaggio di un qualsiasi prodotto. Tra tutte le nuove tecnologie approdate nella "nuova fabbrica", il DM, declinazione industriale della realtà virtuale, rappresenta senza dubbio lo strumento che, attraverso il concetto primario della simulazione, offre un più ampio spettro di possibilità per la progettazione, gestione e ottimizzazione dei processi produttivi (Mourtzis, D., Doukas, M., & Bernidaki, D., 2014).

Dal punto di vista ergonomico l'approccio DM è quello di, riferendosi al processo, applicare i metodi ergonomici direttamente all'ambiente virtuale in modo da garantire, già durante la fase di progettazione, un'alta correlazione tra i risultati ottenuti dalla simulazione virtuale con quelli ottenuti dall'analisi fisica dell'attività di lavoro. Grazie a questo processo diventa possibile utilizzare gli indici di valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico al momento della progettazione in modo da cambiare e migliorare le soluzioni progettuali e bilanciare nel modo migliore il carico di lavoro tra i lavoratori. Un'altra funzionalità di particolare interesse è quella di verifica dell'occupazione degli spazi, che permette di identificare preventivamente il verificarsi di collisioni-contatti tra organi in movimento non voluti e che possono essere causa di danneggiamento alle persone o all'impianto.

Il fattore chiave per migliorare la fase di progettazione, caratterizzata dal *Digital Manufacturing*, è quello di inserire negli ambienti virtuali un modello digitale umano per effettuare simulazioni di qualsiasi delle operazioni manuali che sono previste nel processo di produzione. Tale sistema, che si integra perfettamente nel concetto di interconnessione uomo-macchina dell'Industria 4.0, è chiamato *Digital Human Modeling (DHM)*. Il DHM è un metodo di simulazione “*human-centred*” nell'ambiente virtuale, in cui i manichini sono dei modelli digitali in grado di simulare l'uomo da un punto di vista cinematico e dinamico. Mediante i modelli CAD di prodotto e processo, è possibile riprodurre le postazioni di lavoro e studiare l'interazione con l'uomo, rappresentato dal manichino virtuale.

La progettazione del processo produttivo, effettuata mediante rappresentazione dell'operatore con gli strumenti DHM, è affiancata alla *valutazione ergonomica preventiva*, incentrata sul benessere dell'operatore. L'ergonomia preventiva consiste nella valutazione dei fattori di rischio connessi al processo produttivo, consentendo l'individuazione di soluzioni ottimali in termini ergonomici già nella fase di progettazione.

Le analisi di raggiungibilità/accessibilità svolte in fase di progettazione mediante l'ausilio delle simulazioni virtuali permettono di analizzare gli spazi raggiungibili dal manichino virtuale o quelli da raggiungere con le attrezzature necessarie al completamento del compito lavorativo in esame. Un altro aspetto che si può analizzare tramite l'utilizzo del *DHM* è quello di verificare il campo visivo dell'operatore osservando l'operazione dal punto di vista del manichino. In tal modo l'ergonomo (ingegnere/progettista esperto di ergonomia) ha la possibilità di ottimizzare la postura assunta dall'operatore durante lo svolgimento del compito di lavoro, tenendo anche in considerazione i requisiti di visibilità della zona di lavoro.

Nella figura 1 è mostrato un esempio di analisi di raggiungibilità e visibilità dell'operazione svolta dal manichino inserito in un ambiente virtuale di una linea di produzione automobilistica.

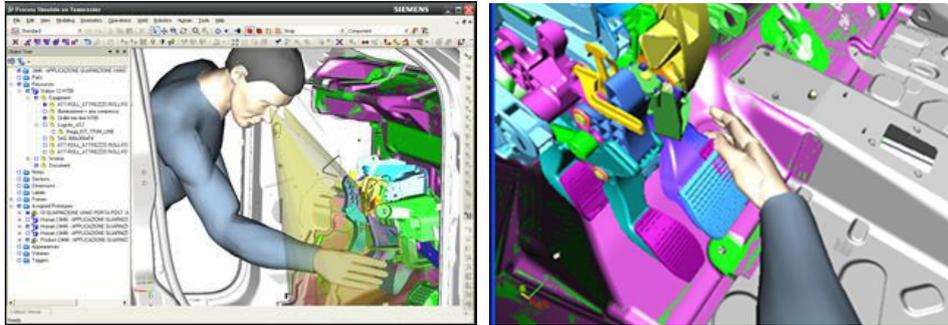


Figura 1: Simulazione di raggiungibilità in ambiente Tecnomatix Process Simulate

In generale, i programmi DHM sono sempre più usati per diminuire i tempi e i costi di progettazione. Negli ultimi anni, il loro sviluppo è stato prioritario per il largo utilizzo che se ne fa nell'ambito industriale. Infatti, diversi software commerciali sono stati sviluppati e tra i più noti si possono citare: Jack, 3DSSPP, Ramsis, Delmia o AnyBody. Questi strumenti software differiscono tra loro per la complessità del modello, la funzionalità e il campo di applicazione, e quindi per la qualità e l'accuratezza dei risultati. Infatti, è da considerare che a seconda del modello virtuale e del software utilizzato possono variare i tempi necessari ad effettuare una simulazione (da considerare sia il tempo dovuto alla preparazione della simulazione che il tempo di calcolo). Per questo motivo, spesso in ambito industriale sono anche utilizzati strumenti decisamente più semplici, ma che permettono di ottenere risultati in tempi molto brevi.

Con i software DHM è possibile creare opportuni ambienti virtuali, mediante i quali si può riconfigurare la simulazione consentendo di studiare il sistema in un ampio spettro di condizioni, effettuando le verifiche ergonomiche riguardanti postura, forza, movimentazione manuale dei carichi e movimenti ripetuti ad alta frequenza, nonché raggiungibilità di determinati punti o di accessibilità mani/corpo del lavoratore.

Gli strumenti DHM nascono per effettuare simulazioni virtuali semplici con costi contenuti, per cui molte aziende accettano i limiti ed i problemi tecnici come le approssimazioni dei risultati delle analisi ergonomiche dovute alle inesattezze del modello antropometrico. Tuttavia, disporre di informazioni antropometriche aggiornate e precise della popolazione di interesse è un aspetto cruciale affinché le analisi risultanti abbiano successo e raggiungano adeguati livelli di affidabilità (Rasmussen, J., et al., 2017).

Questo aspetto definisce la sfida della creazione di popolazioni virtuali rappresentative di particolari gruppi geografici o etnici. Sfortunatamente, questo compito non è banale perché le popolazioni cambiano le proprie dimensioni antropometriche nel tempo (De Vries, C., et al., 2010), sia per fattori di secular trend all'interno della stessa popolazione, sia a causa di fattori sociali come l'immigrazione, che rendono sempre più difficile nel mondo odierno identificare una popolazione o un gruppo etnico. Quindi la raccolta dei dati dovrebbe anche essere ripetuta a intervalli regolari, ma questo non è sempre possibile in quanto la raccolta di dati antropometrici è costosa e richiede tempo.

I database antropometrici accessibili variano nei metodi di raccolta, nei parametri registrati e presentazione dei dati. Proprio in base a quest'ultimo parametro, è possibile identificare due categorie (Rasmussen, J., et al., 2017):

- **Dati non aggregati**, per esempio tabelle delle dimensioni misurate di ogni individuo della popolazione misurata.
- **Dati aggregati**, per esempio media e deviazione standard delle dimensioni riportate.

Il numero di database antropometrici accessibili della prima categoria, vale a dire contenenti dati grezzi, è piuttosto piccolo. Per un riferimento dettagliato dell'antropometria umana, le opzioni sono limitate all'indagine antropometrica del personale dell'esercito statunitense (Gordon et al., 1989), meglio conosciuto come ANSUR e quella relativa ai civili americani ed europei CAESAR (Harrison and Robinette, 2002). I dati ANSUR sono stati resi disponibili in internet, mentre i dati CAESAR sono un prodotto commerciale acquistabile dalla "Society of Automotive Engineers (SAE)". Ovviamente, la validità di questi database è limitata alla popolazione di riferimento ed al periodo in cui sono stati raccolti.

Al contrario di ANSUR e CAESAR, la maggior parte dei database accessibili presenta informazioni in termini di dati aggregati e sintetizzati statisticamente, che coprono diverse popolazioni e differenti sottogruppi etnici. La National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) (Calafat, 2006) è la più famosa e raccoglie i dati di un campione molto ampio di cittadini americani, seppur limitata a poche misure antropometriche. Per quanto riguarda i database degli italiani va ricordato quello derivato dal progetto "L'Italia si Misura" condotto negli anni '90 su più di 4000 Italiani i cui principali dati aggregati sono riportati nella ISO 7250-2 e altre pubblicazioni (Masali, 2013; Fubini et al., 2010). Tale database è riferito alla popolazione generale italiana di circa 30 anni fa, dunque potrebbe essere di

particolare interesse verificare l'attualità dei dati e di valutare le differenze tra la popolazione lavorativa con quella generale.

Nella realtà dell'industria 4.0 e della progettazione "human-centred", è di fondamentale importanza che i dati antropometrici usati come riferimento siano aggiornati ed affidabili per rappresentare la popolazione di interesse. Proprio a questo proposito, nel corso di questo lavoro di tesi, è stata presentata una metodologia per definire ed analizzare una banca dati antropometrica non aggregata della popolazione lavorativa negli stabilimenti italiani di Fiat Chrysler Automobiles (FCA). Nel corso del progetto, chiamato "La Fabbrica si Misura", è stata prevista la misurazione di un campione molto ampio, infatti il numero delle persone misurate è superiore a qualsiasi altra campagna di misurazione antropometrica svolta in Italia. L'ampio campione misurato ha portato, non solo ad un database antropometrico aggiornato e recente della popolazione lavorativa italiana, ma ha anche permesso una stima più affidabile delle misure di interesse, rispetto alle campagne di misurazione precedentemente svolte in Italia.

Nell'ottica dell'Industria 4.0, la stima delle corrette misure antropometriche del lavoratore diventano di fondamentale importanza per lo "human-centred design" e per la progettazione dei sensori e dispositivi che permettono l'interconnessione tra il lavoratore e il processo produttivo. Infatti, sarà di fondamentale importanza all'affiancamento di alcune specifiche tecnologie come la realtà virtuale immersiva (Immersive virtual reality) già particolarmente usata nell'industria con specifiche applicazioni in ergonomia (Grajewski, D., et al., 2013; Lawson, G., Salanitri, D., & Waterfield, B., 2016) o dei dispositivi indossabili (Wearable devices) che comprendono orologi, occhiali, guanti, indumenti, tute, cerotti e così via (Seneviratne, S., et al., 2017) capaci di monitorare parametri di movimento o di stimare gli angoli posturali (Picerno, P., et al., 2008) ed essere utilizzati in applicazioni di ergonomia per effettuare valutazioni preventive del rischio (Caputo, F., et al., 2017).

Inoltre, negli ultimi anni, allo scopo di diminuire la percentuale di lavoratori esposti al rischio di sviluppo di malattie muscolo-scheletriche correlate all'attività lavorativa, molte aziende stanno investendo nella ricerca di dispositivi indossabili, meglio noti come "esoscheletri" (De Looze, M. P., et al., 2016). Gli esoscheletri sono formati da una struttura meccanica esterna, e possono essere suddivisi in due categorie: "attivi" o "passivi". Un esoscheletro attivo è composto da un attuatore (motore elettrico, idraulico o pneumatico) che aumenta la forza dell'operatore e aiuta a diminuire le sollecitazioni sulle articolazioni umane (Gopura, R. A. R. C., et

al., 2016), mentre un sistema passivo non utilizza alcun tipo di attuatore, ma piuttosto usa materiali, molle o smorzatori per immagazzinare energia raccolta dal movimento umano da usare per supportare una postura o un movimento. In ogni caso, a prescindere dal tipo di esoscheletro, esso è un dispositivo indossabile che per essere progettato o ottimizzato necessita della stima delle misure antropometriche della popolazione utilizzatrice.

Infine, tra tutte le possibili applicazioni di una banca dati antropometrica aggiornata, è assolutamente importante citare quella della generazione di manichini virtuali, rappresentativi della popolazione lavorativa italiana, da utilizzare nei software DHM. Infatti, la scelta delle misure antropometriche rilevate nel corso del progetto: “La Fabbrica si Misura” sono state mirate allo scopo di ottenere manichini virtuali per effettuare valutazioni ergonomiche coerenti con quanto specificato dalle normative tecniche internazionali. L’implementazione di un modello antropometrico aggiornato e rappresentativo della popolazione di interesse permetterà di ottenere risultati più affidabili dalle simulazioni virtuali. Nella figura 2 è mostrato un set di manichini virtuali di diversi percentili maschili e femminili del software Jack.

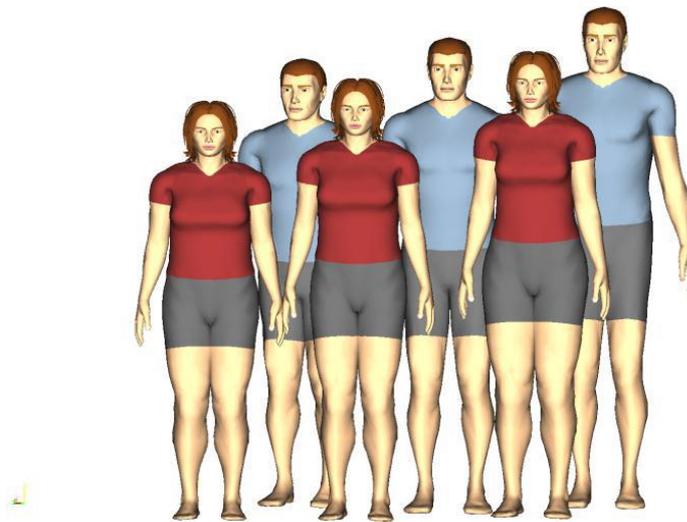


Figura 2: Manichini virtuali del 5°, 50° e 95° percentile maschile/femminile

Struttura della Tesi

Il presente lavoro di tesi è stato strutturato in tre capitoli, ripercorsi in ordine temporale rispetto ai lavori scientifici svolti durante il dottorato di ricerca. Ogni capitolo è incentrato su un diverso obiettivo di ricerca, pertanto in ognuno di essi

compare un primo paragrafo di introduzione che riporta lo stato dell'arte sulla tematica affrontata.

Il capitolo 1 è incentrato su tre diverse applicazioni di DHM per la progettazione industriale, dove sono stati proposti e validati degli strumenti utilizzati per effettuare valutazioni ergonomiche nella fase preliminare di progettazione. Questo capitolo è una raccolta di tre articoli scientifici pubblicati in diverse sedi durante il triennio di dottorato che sono stati tradotti in italiano. Ogni paragrafo del capitolo corrisponde ad una differente pubblicazione:

- Il §1.2 corrisponde ad un lavoro, dapprima, presentato al “XI Congresso Nazionale SIE 2016 - Ergonomia: sfide sociali e opportunità professionali dalla creatività alla pratica per aumentare l'impatto dell'ergonomia nella società” (Castellone, R., et al., 2016) e successivamente ampliato e pubblicato per rivista (Castellone, R., et al., 2017a). Esso consiste in un confronto tra i risultati di prove di raggiungibilità di punti di lavoro tra due strumenti DHM. I due software differiscono per complessità e gradi di libertà dei modelli cinematici, dunque il confronto permette di valutare l'accuratezza di uno strumento più semplice e veloce rispetto ad uno di riferimento, allo scopo di validarne l'utilizzo.
- Il §1.3 è stato pubblicato per rivista internazionale (Castellone, R., et al., 2017b). In questo lavoro, dopo averne valutato l'accuratezza e validato l'utilizzo, sono stati analizzati dei casi studio in applicazioni reali industriali. In queste applicazioni, sono state effettuate delle valutazioni ergonomiche posturali con diversi percentili antropometrici, così da evidenziare le diverse criticità nella raggiungibilità dei punti di lavoro per diverse antropometrie.
- Infine, il §1.4 è stato presentato e pubblicato per la conferenza “Applied Human Factors and Ergonomics 2017” (Castellone, R., et al., 2017c). In quest'ultimo lavoro è stato proposto un metodo per la generazione di mappe posturali (durante operazioni di raggiungibilità di punti di lavoro) di facile utilizzo per un ergonomo in fase di progettazione. Successivamente, tali mappature sono state normalizzate rispetto alle dimensioni corporee caratteristiche, così da poter essere usate per qualsiasi antropometria.

Le applicazioni del capitolo 1 hanno messo in evidenza l'importanza di un modello antropometrico aggiornato ed affidabile alla base dei DHM. A questo

proposito nel capitolo 2 è descritta nel dettaglio la metodologia utilizzata per la definizione di una banca dati a supporto della progettazione, nello specifico riferita al progetto: “La Fabbrica si Misura”. Inoltre, sono mostrati i risultati delle analisi statistiche effettuate sul campione misurato.

Infine, il capitolo 3 di questa tesi mostra una panoramica dei diversi approcci alla progettazione ergonomica, e di conseguenza i criteri con cui è possibile generare modelli antropometrici e manichini virtuali da utilizzare come riferimento per la progettazione. Inoltre, come esempio applicativo, sono stati ottenuti set di manichini virtuali con diversi approcci, utilizzando i dati ottenuti dalle analisi svolte nel capitolo 2.

Capitolo 1

Digital Human Modeling per l'ergonomia e la progettazione industriale

1.1 Introduzione

Nell'ambito dello studio della funzionalità dell'uomo nel suo ambiente di lavoro, nell'ottimizzazione dei suoi compiti e nella progettazione della sua postazione lavorativa, è ormai prioritario l'utilizzo dell'ergonomia proattiva, atta a prevedere e gestire i cambiamenti e i problemi legati alla realtà dinamica del mondo industriale. Nasce dunque la necessità di fare uso di strumenti di simulazione virtuale, i cosiddetti Digital Human Modeling (DHM), capaci di analizzare i parametri posturali e di fornire, in tempi relativamente brevi, valutazioni ergonomiche da riferire alle normative tecniche internazionali.

I programmi DHM sono sempre più usati per diminuire i tempi e i costi di progettazione (Chaffin, D. B., 2005). Negli ultimi anni, diversi software commerciali sono stati sviluppati e in alcuni studi sono state proposte classificazioni di questi strumenti, in relazione a diversi criteri per il loro uso in fase di progettazione (Poirson, E., & Delangle, M., 2013). Questi strumenti software differiscono tra loro per la complessità, funzionalità e campo di applicazione, ma anche per la qualità e l'accuratezza dei risultati. Un'iniziale differenziazione può esser fatta rispetto alla complessità del modello cinematico alla base del manichino virtuale. I manichini "multibody" sono catene cinematiche aperte costituite da segmenti rigidi (segmenti corporei), collegati tra loro mediante giunti (articolazioni), caratterizzati da un certo numero di gradi di libertà (g.d.l.). Nei più complessi e accurati programmi, i giunti generalmente sono costituiti da tutti i g.d.l. corrispondenti all'articolazione reale, ma sono necessari tempi maggiori per preparare la soluzione e per i tempi di simulazione stessi. Altri strumenti usano un modello cinematico più semplice, caratterizzato da un numero limitato di g.d.l. per

alcuni giunti, permettendo di ottenere risultati in tempi più brevi. Questi modelli semplificati potrebbero essere preferiti in applicazioni industriali, specialmente nella fase iniziale della progettazione, quando sono richieste numerose e continue modifiche delle condizioni da simulare.

Nei successivi paragrafi di questo capitolo (§§1.2-1.3-1.4), saranno presentate le traduzioni in italiano di tre lavori, corrispondenti a diverse applicazioni con strumenti DHM, allo scopo di confrontare e validare l'utilizzo di strumenti semplificati per applicazioni industriali. Inoltre, saranno analizzati casi studio e applicazioni reali per mettere in evidenza l'utilità di tali strumenti.

1.2 Confronto tra strumenti di Digital Human Modeling per prove di raggiungibilità

In questo paragrafo sarà presentato uno studio indirizzato su un modello semplificato con un numero limitato di g.d.l. e con la cinematica vincolata nel piano sagittale. Lo scopo di questo studio è capire se questo strumento possa calcolare, con ragionevole accuratezza, il costo posturale associato a differenti punti di lavoro nell'area di raggiungibilità dell'operatore.

La previsione posturale è una delle principali applicazioni degli strumenti di modellazione virtuale: definendo il punto di lavoro, il modulo di previsione posturale permette di simulare, attraverso cinematica inversa, la postura che un operatore tenderà ad assumere. In questo modo, l'ergonomo potrebbe determinare gli angoli posturali dei diversi giunti e valutare il costo posturale dell'attività lavorativa attraverso un confronto con i requisiti indicati nelle normative tecniche internazionali (ISO 11226, ISO 1005-4) oppure tramite gli strumenti di valutazione del rischio, come OWAS, spesso implementati nei DHM. La previsione posturale è influenzata dal livello di complessità del manichino virtuale e dai g.d.l. associati ai differenti giunti.

Il problema della raggiungibilità è stato ampiamente studiato con test sperimentali, allo scopo di definire superfici rappresentative della massima raggiungibilità di un operatore (Bullock, M. I., 1974), sebbene le superfici sono maggiormente riferite alla postura assisa, probabilmente perché hanno un più ampio campo di applicazione (per esempio la raggiungibilità in un veicolo). Invece, Sengupta e Das (2000) hanno effettuato test sperimentali su un campione diviso per genere, sia in postura eretta che assisa, allo scopo di ottenere curve di raggiungibilità massima per diversi percentili antropometrici.

I test sperimentali su soggetti reali possono essere statisticamente analizzati per sviluppare diversi modelli di previsione posturale; questo approccio è chiamato modellazione empirico-statistica. Questi modelli sono stati implementati in diversi software. Per esempio, il 3D Static Strength ProgramTM (3DSSPP) si riferisce ad un modello empirico-statistico sviluppato da Beck and Chaffin (1992). Il 3DSSPP è considerato un modello di riferimento in letteratura e sarà usato come base per i confronti.

Altri strumenti DHM implementano un modulo di previsione posturale basato su algoritmi di cinematica inversa. La movimentazione dei segmenti rigidi è matematicamente modellata formulando un set di equazioni che possono essere risolte per calcolare gli angoli dei giunti (Abdel-Malek, K. et al., 2001). Invece, Delangle, M. et al. (2016) valutarono le differenze tra metodi numerici ed esperimenti reali per test di raggiungibilità. L'approccio con la cinematica inversa fu già usato nel lavoro di Ryan, P. W. et al. (1970) per effettuare simulazioni della raggiungibilità dei piloti all'interno di una cabina di pilotaggio degli aerei. L'uso di funzioni obiettivo ha migliorato questi modelli rendendo la previsione posturale più realistica (Jung, E. S. et al., 1994).

Un manichino virtuale semplificato, con un numero limitato di g.d.l. e vincolato nel piano sagittale, è già stato usato per simulazioni di raggiungibilità (Parkinson, M. B., & Reed, M. P., 2007). Nel loro lavoro, gli autori hanno definito superfici inviluppo che sono rappresentative della massima raggiungibilità nello spazio, per un dato valore di flessione del tronco del manichino. In particolare, hanno ottenuto tre superfici relative alla massima raggiungibilità nello spazio per le condizioni di 0, 30 e 60 gradi di flessione del tronco. Tuttavia, queste curve non permettono la valutazione della flessione del tronco per punti di lavoro all'interno dell'area di raggiungibilità.

L'obiettivo di questo studio è fornire indicazioni sul costo posturale associato alla raggiungibilità dei punti di lavoro all'interno dell'area di fronte al manichino e di confrontare la postura prevista da due strumenti DHM caratterizzati da un diverso grado di complessità della cinematica del manichino e un diverso approccio per risolvere la ridondanza del problema cinematico. I confronti riguardano gli angoli di flessione del tronco ed elevazione del braccio, ed il costo posturale è basato su valutazioni di tipo semaforico, come richiesto dalle normative tecniche internazionali ISO 11226 (2000) e UNI EN 1005/4 (2009).

Come secondo obiettivo, si è investigato sull'effetto delle posture simulate sulle analisi biomeccaniche, calcolando i momenti di reazione agenti sui giunti e la percentuale della popolazione capace di sostenere questo carico. Test sperimentali hanno ampiamente dimostrato che la postura influenza la forza esercitabile e sopportabile (Chaffin, D.B. et al., 1983; Wilkinson, A.T. et al., 1995; Roman-Liu, D., & Tokarski, T., 2005; Chow, A. Y., & Dickerson, C. R., 2009). Più recentemente, usando i dati sperimentali, sono state ottenute equazioni per prevedere la forza esercitabile rispetto alla posizione delle mani e la postura del braccio (La Delfa, N. J. et al., 2014). La Delfa e Potvin (2016) hanno anche studiato la relazione tra forza del braccio, momento agente sulla spalla e postura del braccio, ricercando posture e direzioni dove la forza esercitabile può essere massimizzata. La forza esercitabile dipende dalla capacità di sopportare il carico delle diverse articolazioni. Infatti, le equazioni basate su studi sperimentali delle forze con diverse posture (Clarke, H.H., 1966; Stobbe, T.J., 1982; Kumar, S. et al., 1988) sono state implementate in molti strumenti DHM allo scopo di valutare il percentile di forza (la percentuale della popolazione con la capacità di sopportare un momento su un certo giunto maggiore del momento risultante agente)

1.2.1 Descrizione dello studio

La prima parte di questo studio è stata mappare gli angoli posturali di flessione del busto ed elevazione del braccio ottenuti dalle simulazioni posturali di operazioni di raggiungibilità. I software DHM usati per questo scopo sono il 3DSSPP della University of Michigan, e uno strumento chiamato Human Model (HM), utilizzato per rapide valutazioni in fase progettuale, che Fiat Chrysler Automobiles (FCA) ha sviluppato in collaborazione con l'Università della Campania Luigi Vanvitelli. Lo HM è un semplice e rapido strumento che può essere utilizzato come un foglio di calcolo Excel, e può essere usato anche da ergonomi senza particolari esperienze con la modellazione umana virtuale.

I due software

Il 3DSSPP è un programma particolarmente adatto all'analisi di movimenti e posture durante compiti di movimentazione manuale dei carichi. Nello specifico, è stato sviluppato per simulare posture statiche o movimenti lenti (assumendo che gli effetti dovuti alle accelerazioni sono trascurabili). La figura 1 mostra il modello umano "stilizzato" e quello in 3D del software.

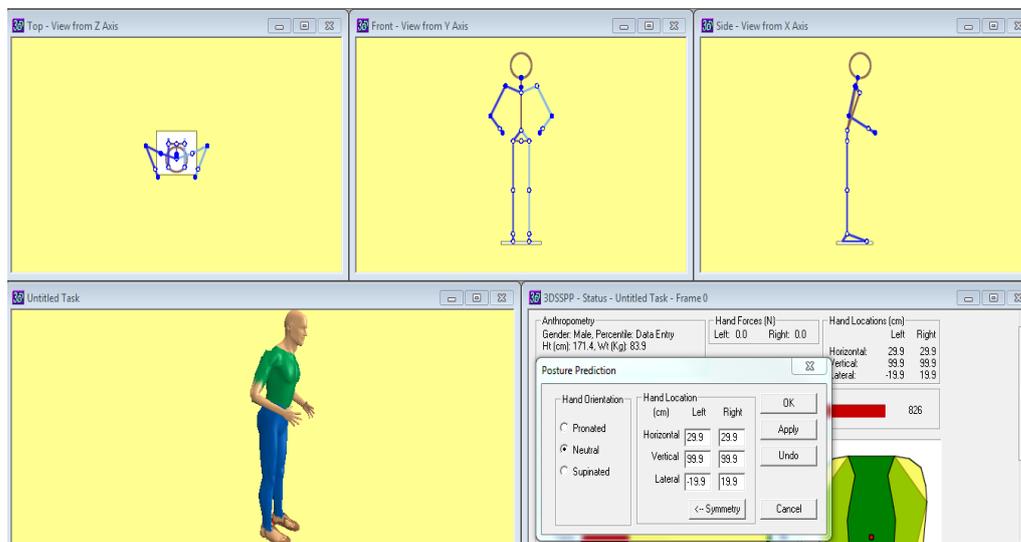


Figura 1.1: Interfaccia grafica del 3DSSPP.

Il 3DSSPP ha due opzioni di utilizzo: la prima consiste nel settare gli angoli posturali come dato input per posizionare il manichino nella posizione desiderata (cinematica diretta). La seconda opzione (cinematica inversa) permette di prevedere la postura assunta dall'operatore, inserendo le coordinate del punto da raggiungere con le mani. In particolare, permette di simulare la postura che una persona probabilmente assumerà durante un compito di raggiungibilità. Però, la postura prevista potrebbe non essere la postura che ogni persona tenderà ad assumere a causa delle differenze tra gli individui dovute al fisico, all'esperienza ed al comportamento (The University of Michigan, 1995). Il manichino virtuale del 3DSSPP è un avanzato modello biomeccanico, che permette di calcolare tutte le forze e i momenti applicati in ogni giunto del modello. Il modello, a partire dal carico agente sulle mani, risolve l'equilibrio statico e calcola tutte le reazioni nei giunti fino alla reazione sul pavimento (Chaffin, D.B. et al., 1999).

Lo HM è usato in FCA nella fase iniziale della progettazione delle postazioni di lavoro della linea di produzione, per la sua particolare semplicità e velocità di utilizzo. Diversamente dal 3DSSPP, lo HM è un semplice modello "multibody", dove ogni segmento corporeo è modellato con un segmento rigido privo di massa e di una data lunghezza. Ogni segmento corporeo è connesso al segmento adiacente tramite giunti, a ognuno dei quali è associato un certo numero di g.d.l. a seconda della movimentazione del giunto. Nello specifico, il giunto pelvico e quello della spalla, essendo giunti sferici, sono composti ciascuno da tre gradi di libertà, il

giunto del gomito ha un solo grado di libertà, mentre non è possibile controllare i giunti del ginocchio e della caviglia (Spada, S. et al., 2013). La cinematica del manichino antropometrico presenta una struttura gerarchica dei nodi, a partire dal nodo principale che è quello pelvico. Questo significa che una rotazione di un giunto “padre” mette in movimento anche un giunto “figlio”, mentre viceversa, una rotazione di un giunto “figlio” non ha nessun impatto su un giunto “padre” (Talamo, L., 2007). Anche in questo strumento, oltre alla cinematica diretta è possibile utilizzare quella inversa, ma in questo caso, i gradi di libertà si riducono a tre: flessione del busto, elevazione frontale del braccio e flessione del gomito. Questa semplificazione permette di simulare posture nel piano, rendendo necessaria la definizione di sole due coordinate del punto da raggiungere (Z = altezza verticale ed Y = distanza orizzontale). La coordinata X è relativa alla distanza del punto di lavoro dal piano frontale; essa è automaticamente impostata con il valore della coordinata X del gomito per il relativo percentile antropometrico utilizzato.

Allo scopo di rendere il problema cinematico univocamente risolvibile, l’algoritmo di previsione posturale ricerca la postura del manichino seguendo due condizioni cinematiche (1-2):

1. Se il punto di lavoro è all’interno della zona di raggiungibilità del braccio, la postura viene ottenuta mediante la rotazione dei giunti spalla e gomito (angoli γ e θ , rispettivamente in figura 1.2), mentre il busto rimane in posizione eretta (Condizione cinematica 1).
2. Se il punto di lavoro è più lontano, la postura è ottenuta mediante la movimentazione dei giunti schiena e spalla (angoli θ e α , rispettivamente in figura 1.3), mentre il braccio è disteso senza piegare il gomito (Condizione cinematica 2).

Le figure 1.2 e 1.3 mostrano l’interfaccia grafica dell’ambiente HM con le viste frontali e laterali del manichino ed il loro sistema di riferimento. La vista frontale mostra metà del manichino per la simmetria rispetto il piano sagittale.

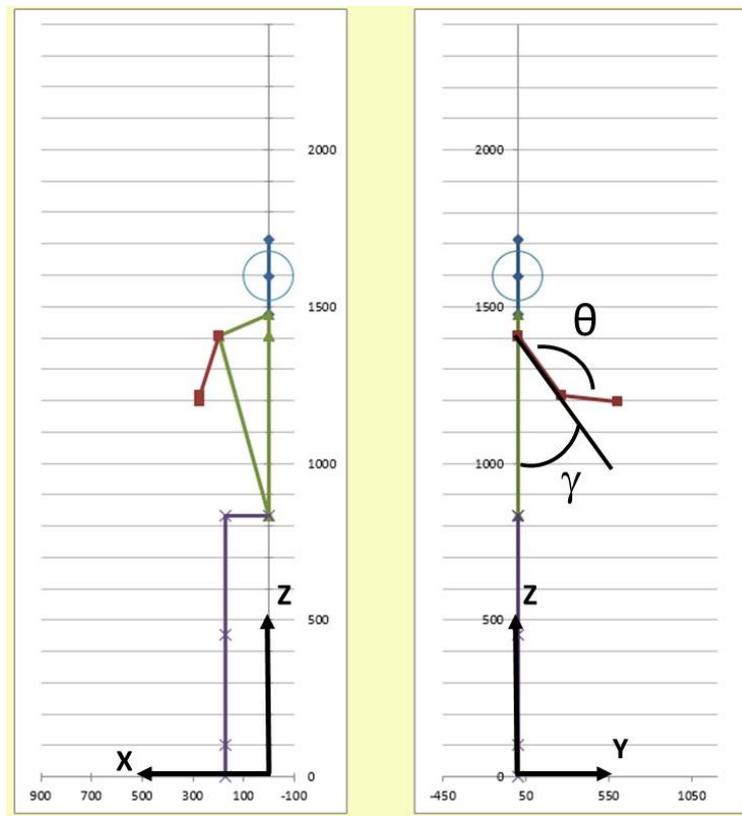


Figura 1.2: Vista frontale e laterale dell'interfaccia grafica HM. La postura del manichino è in condizione cinematica 1, γ è l'angolo di elevazione del braccio e θ è l'angolo di flessione del gomito.

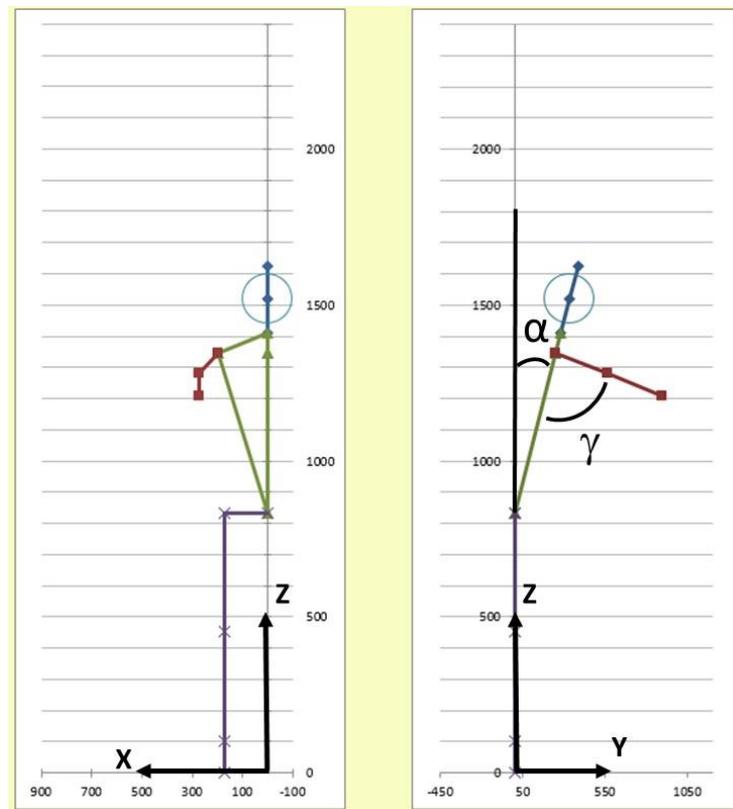


Figura 1.3: Vista frontale e laterale dell'interfaccia grafica HM. La postura del manichino è in condizione cinematica 2, α è l'angolo di flessione del tronco e γ è l'angolo di elevazione del braccio

Modelli antropometrici

I database antropometrici a cui fanno riferimento i due software sono differenti, il 3DSSPP si basa sul National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES), uno studio condotto sulla popolazione civile americana, mentre lo HM si riferisce alle normative tecniche internazionali ISO 7250-1 (2008) e ISO 7250-2 (2009) usando la popolazione di interesse.

In entrambi i programmi, l'antropometria del manichino virtuale può essere impostata selezionando il genere, la popolazione di interesse (nel caso dello HM), e scegliendo un percentile antropometrico tra il 5°, il 50° e il 95° (P5, P50 e P95). In aggiunta, il 3DSSPP permette la creazione di manichini personalizzabili attraverso tecniche di "scalatura", usando altezza e peso come parametri input. In questo lavoro, allo scopo di minimizzare le differenze antropometriche tra i manichini, è stato selezionato per lo HM il P50 italiano maschile, mentre è stato

creato un “manichino scalato” con il 3DSSPP usando l'altezza e il peso del P50 italiano maschile scelto per lo HM.

Spazio di raggiungibilità

Per la mappatura degli angoli posturali, sono state effettuate diverse prove di raggiungibilità con entrambi gli strumenti di simulazione. In cinematica inversa, il modulo di previsione posturale dello HM movimentava il manichino su piani paralleli al piano sagittale. Per i confronti, in entrambi gli strumenti la coordinata X è stata impostata a 200 mm, che rappresenta un punto allineato con il giunto rappresentativo del gomito del manichino. L'area di raggiungibilità, nel piano $X = 200$ mm, è stata delimitata verticalmente dalla statura ($Z = 1700$ mm) e dall'altezza del giunto pelvico ($Z = 900$ mm) del manichino. Invece, nella distanza orizzontale Y, i punti di lavoro più vicini sono stati scelti a 200 mm dal piano frontale senza considerare la profondità del corpo e problemi di collisione, mentre i punti più lontani ($Y = 900$ mm dal piano frontale) sono stati scelti come limite per non incorrere in problemi di sbilanciamento (in figura 1.4 è mostrato il piano di raggiungibilità analizzato). All'interno dell'area di raggiungibilità è stata definita una griglia di 48 punti di lavoro distinti.

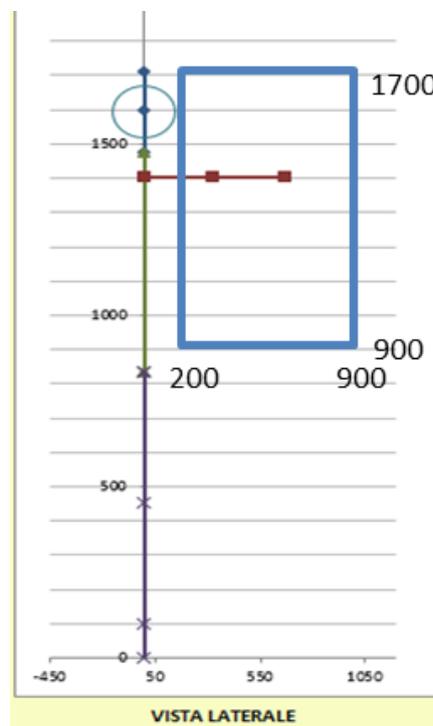


Figura 1.4: Area di raggiungibilità scelta per le simulazioni posturali.

Gli angoli posturali

Per ogni punto di lavoro definito sulla griglia, è stata effettuata una simulazione di previsione posturale con entrambi i software, dopodiché, per ogni postura ottenuta sono stati calcolati gli angoli posturali relativi all'angolo di flessione del tronco (α) e di elevazione del braccio (γ) misurati come definito dalle normative tecniche (ISO 11226 ed UNI EN 1005-4).

L'angolo di flessione del tronco (α) è definito sul piano sagittale, come l'inclinazione del tronco rispetto alla verticale. In particolare, il segmento che definisce l'inclinazione del tronco è quello congiungente i due punti antropometrici relativi al "gran trocantere" e la "7^a vertebra cervicale".

L'angolo di elevazione del braccio (γ) è definito come l'elevazione del braccio durante l'esecuzione di un compito rispetto ad una postura di riferimento. Il segmento che definisce l'elevazione del braccio è quello congiungente i punti antropometrici relativi al giunto "acromio-clavicolare" e quello "omero-radiale". L'angolo calcolato non dipende dalla direzione di vista durante la misurazione, ma è quello reale in 3D, mentre l'angolo della postura di riferimento del braccio è considerato a 13° dalla verticale (ISO 11226 ed UNI EN 1005-4).

Come anticipato, lo HM è un modello semplificato con un numero ridotto di g.d.l. Infatti, la cinematica inversa utilizzata per effettuare le previsioni posturali non valuta l'adduzione/abduzione del braccio, poiché la coordinata X del punto di lavoro è automaticamente allineata con il giunto gomito. Per questa ragione, l'elevazione del braccio (γ) data come output dal HM coincide con l'angolo di elevazione frontale del braccio e può essere calcolato sul piano sagittale. Invece, il 3DSSPP non ha limitazioni sul numero di g.d.l. del giunto spalla e l'angolo di elevazione del braccio dato come output è un angolo in 3D. A questo proposito, successivamente, questo angolo è stato decomposto nell'angolo di elevazione frontale del braccio (misurato nel piano sagittale) e nell'angolo di adduzione/abduzione (misurato nel piano frontale), allo scopo di studiare il ruolo della componente adduzione/abduzione che è trascurata nello HM.

Impostazioni delle simulazioni

Viste le differenze tra i due strumenti di DHM utilizzati, sono state seguite procedure diverse per impostare le simulazioni. Come anticipato, lo HM è uno strumento creato per ottenere risultati e valutazioni in maniera semplice ed in tempi

molto brevi, infatti i parametri per impostare le simulazioni sono più limitati e prevedono nello specifico: scelta della popolazione di riferimento, genere, percentile antropometrico e posizione del punto da raggiungere con le mani. Mentre, nel 3DSSPP, oltre agli stessi parametri input del HM, sono da definire: carico agente sulle mani, postura delle mani (prona, neutra, supina) e l'eventuale vincolo di parte della catena cinematica. I parametri impostati sono riassunti nella tabella 1.1. Le scelte dei parametri del carico agente sulle mani, postura delle mani e dei movimenti vincolati per il 3DSSPP sono state effettuate allo scopo di minimizzare le differenze dovute ai diversi modelli dei due software.

Tabella 1.1: Parametri input HM/3DSSPP

Parametri	HM	3DSSPP
Popolazione	Italiana	Americana
Genere	M	M
Percentile	P50	Da statura P50 HM
Coordinate punto da raggiungere	(Y, Z)	(X, Y, Z)
Carico agente sulle mani	-	Nulla
Postura delle mani	-	Neutra
Movimenti bloccati	-	Arti inferiori

Gli angoli di flessione del tronco ed elevazione del braccio sono stati calcolati dalle posture simulate. Questi angoli posturali sono confrontati ed analizzati relativamente alle indicazioni di tipo semaforico fornite dalle normative tecniche internazionali, allo scopo di associare un "costo ergonomico" alle diverse posture.

Analisi biomeccaniche

Oltre alle analisi posturali, le posture simulate con i due programmi sono state analizzate e confrontate per studiare la loro influenza sui modelli biomeccanici. In

particolare, l'attenzione è stata rivolta a comprendere se una cinematica semplificata del manichino possa determinare variazioni significative delle forze e dei momenti calcolati ai giunti. Lo HM è un semplice modello "multibody" che non permette il calcolo di forze e momenti agenti sui giunti, per questo motivo il software utilizzato per questa analisi è stato il 3DSSPP.

Le posture previste con HM sono state manualmente inserite nel 3DSSPP per effettuare le analisi biomeccaniche. I giunti antropometrici di spalla, gomito e mani del "manichino scalato" del 3DSSPP sono stati fatti coincidere con le posizioni stimate dallo HM con una tolleranza di ± 10 mm. Per validare la procedura, sono stati analizzati i punti di lavoro per cui le posture stimate dai due software sono risultate molto simili. In questo modo, è stato escluso un errore sul calcolo del carico biomeccanico a causa dell'inserimento manuale della postura prevista con lo HM nel software 3DSSPP. Inoltre, una forza di 90 N è stata applicata sulla mano destra del manichino con la direzione parallela all'asse verticale ed il verso dall'alto al basso, allo scopo di simulare un sollevamento di un peso approssimativo di 9 kg. Nella figura 1.5 è stato mostrato un esempio, in cui la postura simulata con il software HM per la raggiungibilità del punto di lavoro ($Z=900$ mm; $Y=400$ mm) è stata riprodotta nel software 3DSSPP; in rosso la direzione e la posizione della forza applicata. Infine, per i diversi punti di lavoro e per entrambe le posture previste con i due strumenti, sono stati calcolati con il software 3DSSPP i momenti agenti sui giunti spalla e L5/S1 (giunto tra 5^a vertebra lombare e la 1^a vertebra sacrale).

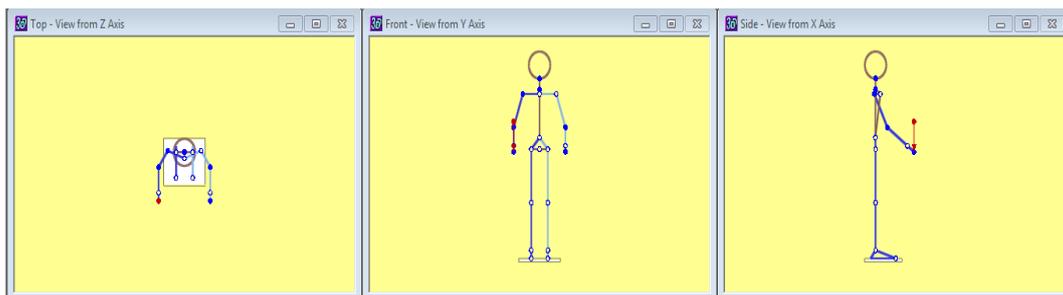


Figura 1.5: Da sinistra a destra, vista dall'alto, frontale e laterale della postura simulata con il software HM e riprodotta manualmente nel software 3DSSPP per la raggiungibilità del punto di lavoro ($Z=900$ mm, $Y=400$ mm)

1.2.2 Risultati e discussioni

Flessione del tronco (α)

Le tabelle 1.2 e 1.3 riportano i valori degli angoli di flessione del tronco (α) per le posture ottenute durante le simulazioni di raggiungibilità effettuate con i due strumenti HM e 3DSSPP. Allo scopo di confrontare i valori, è stato necessario calcolare gli angoli output dei due programmi nello stesso sistema di riferimento. In entrambe le tabelle, le celle sono state colorate coerentemente con quanto indicato nelle normative tecniche (ISO 11226 and UNI EN 1005/4), con una valutazione semaforica corrispondente ai seguenti valori angolari:

- $0^\circ \leq \alpha < 20^\circ$ condizione accettabile (fascia verde)
- $\alpha < 0^\circ$, $20^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ condizione da verificare (fascia gialla)
- $\alpha \geq 60^\circ$ condizione non accettabile (fascia rossa)

Tabella 1.2: Valori angolari ($^\circ$) e la rispettiva valutazione ergonomica di tipo semaforico per l'angolo di flessione del tronco in operazioni di raggiungibilità usando HM. Y e Z (mm) sono le coordinate dei punti di lavoro da raggiungere.

		HM							
		Y							
Z \ Y		200	300	400	500	600	700	800	900
1700		0	0	0	0	1	11	24	NR
1550		0	0	0	0	0	5	16	29
1400		0	0	0	0	0	4	14	25
1200		0	0	0	0	0	7	17	26
1100		0	0	0	0	1	11	20	29
900		0	0	0	7	15	23	31	39

Tabella 1.3: Valori angolari ($^{\circ}$) e la rispettiva valutazione ergonomica di tipo semaforico per l'angolo di flessione del tronco in operazioni di raggiungibilità usando 3DSSPP. Y e Z (mm) sono le coordinate dei punti di lavoro da raggiungere.

		3DSSPP							
Z \ Y	Y	200	300	400	500	600	700	800	900
	1700		0	0	1	4	7	15	33
1550		0	1	3	5	7	11	21	39
1400		2	3	5	6	9	12	18	30
1200		5	6	8	10	12	15	21	33
1100		7	8	10	11	14	17	24	36
900		11	12	14	16	19	27	36	45

Di tutti i 48 punti di lavoro da raggiungere appartenenti alla griglia selezionata per le simulazioni delle posture nelle prove di raggiungibilità, solo per il punto più lontano della griglia scelta (Y=900 mm, Z=1700 mm) non è stato possibile ottenere una postura che ne permettesse la raggiungibilità (NR). I valori angolari di flessione del tronco previsti dallo HM sono generalmente minori. Comunque, considerando le valutazioni ergonomiche semaforiche, il confronto tra le tabelle 1.2 e 1.3 mostra che solo in 2 casi su 47 è stata associata una fascia semaforica differente alle posture previste dai due strumenti: verde per HM e gialla per 3DSSPP. In entrambi i casi, il valore angolare calcolato con il 3DSSPP è di 21° , un valore molto vicino al valore di soglia che separa la fascia verde dalla gialla.

La differenza nel calcolo del flessione del busto tra le posture previste dai due programmi ($\alpha_{3DSSPP} - \alpha_{HM}$) è stata calcolata per tutti i punti della griglia. La media delle differenze angolari per ogni punto della griglia è di 6.3° con una deviazione standard di 3.3° . Le sei curve in figura 1.4 rappresentano la differenza ($\alpha_{3DSSPP} -$

α_{HM}) rispetto alla distanza orizzontale del punto da raggiungere dal corpo per diverse altezze verticali da terra. Nel grafico è indicata la condizione cinematica, corrispondente alla distanza orizzontale, imposta al manichino HM per la movimentazione. Nella zona intermedia entrambe le condizioni cinematiche sono possibili, a seconda della distanza verticale del punto di lavoro, il manichino segue una o l'altra.

Come si può vedere dalla figura 1.6, la massima differenza nell'area di raggiungibilità tra gli angoli di flessione del busto simulati è di 14° , e in solo 6 casi su 47 la differenza tra gli angoli supera i 10° .

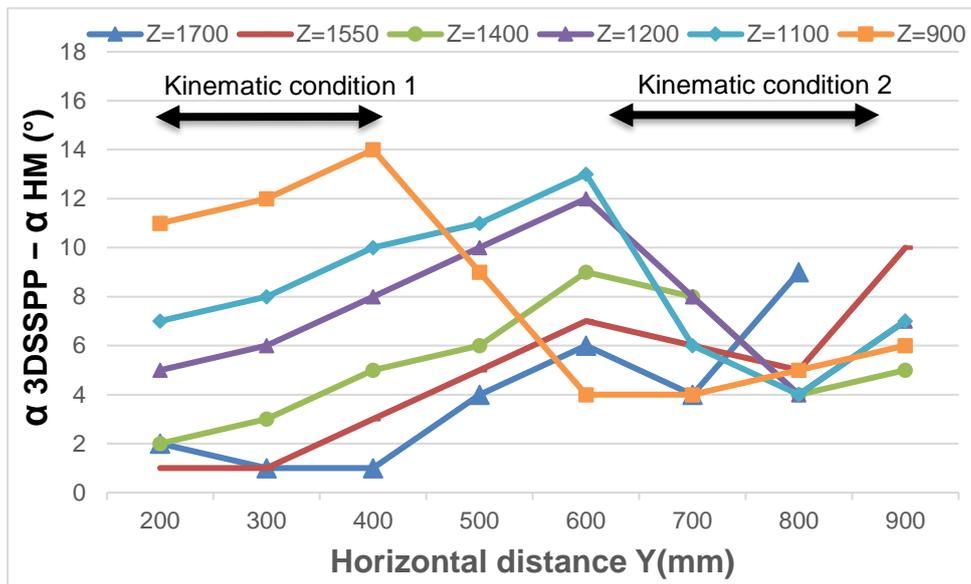


Figura 1.6: Differenza nell'angolo di flessione del tronco calcolato con i due software

Quando il punto da raggiungere è vicino al corpo, la postura prevista dallo HM presenta il busto eretto (vincolata dalla condizione cinematica 1). La postura prevista dal 3DSSPP è basata su un database posturale ed è caratterizzata da un flessione del tronco anche quando il punto di lavoro potrebbe essere raggiunto con la sola movimentazione del braccio, probabilmente per assicurare una migliore visibilità del punto da raggiungere e permettere di applicare una forza maggiore. Infatti, specialmente per i punti di lavoro con un'altezza verticale simile a quella del bacino, l'errore è maggiore. In più, la differenza tra gli angoli di flessione del tronco stimati crescono con la distanza orizzontale fino al punto di transizione alla condizione cinematica 2, mentre per i punti di lavoro in condizione cinematica 2,

tutte le curve tendono a valori simili con differenze angolari minori. All'ulteriore aumento della distanza orizzontale del punto da raggiungere, tendendo al limite di raggiungibilità, la postura prevista dal 3DSSPP è ancora caratterizzata da un maggiore flessione del busto, probabilmente ancora dovuto ad assicurare una migliore visibilità e permettere di esercitare una forza maggiore.

Elevazione del braccio (γ)

Nelle tabelle 1.4 e 1.5 sono riportati gli angoli di elevazione del braccio (γ). Come per le tabelle 1.2 e 1.3, le celle sono colorate coerentemente con quanto indicato nelle normative tecniche ISO 11226 and UNI EN 1005/4:

- $0^\circ \leq \gamma < 20^\circ$ condizione accettabile (fascia verde)
- $20^\circ \leq \gamma < 60^\circ$ condizione da verificare (fascia gialla)
- $\gamma \geq 60^\circ$ condizione non accettabile (fascia rossa)

Tabella 1.4: Valori angolari ($^\circ$) e la rispettiva valutazione ergonomica di tipo semaforico per l'angolo di elevazione del braccio in operazioni di raggiungibilità usando HM. Y e Z (mm) sono le coordinate dei punti di lavoro da raggiungere.

		HM							
Y		200	300	400	500	600	700	800	900
Z									
1700		86	82	84	91	117	129	146	NR
1550		54	54	58	67	82	108	121	138
1400		12	23	35	47	64	93	105	119
1200		EST.	EST.	14	31	54	79	91	104
1100		EST.	EST.	11	30	64	74	86	99
900		EST.	3	25	48	58	69	81	94

Tabella 1.5: Valori angolari ($^{\circ}$) e la rispettiva valutazione ergonomica di tipo semaforico per l'angolo di elevazione del braccio in operazioni di raggiungibilità usando 3DSSPP. Y e Z (mm) sono le coordinate dei punti di lavoro da raggiungere.

		3DSSPP							
Z \ Y	Y	200	300	400	500	600	700	800	900
	1700		90	84	84	89	99	118	146
1550		64	61	64	69	78	92	112	140
1400		32	37	45	52	63	76	94	116
1200		EST.	EST.	28	37	48	62	80	98
1100		EST.	EST.	24	32	44	58	77	93
900		EST.	13	18	29	46	60	74	94

Le normative raccomandano di evitare posture scomode dell'arto superiore, che presentano particolari movimenti di estensione, adduzione e rotazioni. Le posture che richiedono un'estensione del braccio (intesa come retro-flessione o flessione negativa) sono indicate con (EST) e sono considerate non accettabili in termini di valutazione ergonomica. Il confronto tra le fasce colorate delle tabelle 1.4 e 1.5 mostra che in 36 casi su 47 è stata associata la stessa fascia semaforica. Per i 9 casi in cui la fascia semaforica è differente, è importante notare che l'assenza del g.d.l. di abduzione del braccio determina la sottostima dell'angolo reale in 3D di elevazione del braccio per i punti di lavoro vicini al corpo ($Y < 400$ mm). Al contrario, per punti di lavoro più distanti dal corpo, la condizione cinematica 2 con il braccio disteso porta ad una sovrastima dell'angolo di elevazione del braccio. Il calcolo della differenza tra gli angoli di elevazione del braccio tra i due software ($\gamma_{3DSSPP} - \gamma_{HM}$) mostra una differenza media di 9.0° e una deviazione standard di 5.9° .

Come per la figura 1.6, la figura 1.7 mostra il valore della differenza ($\gamma_{3DSSPP} - \gamma_{HM}$) rispetto alla distanza orizzontale per diverse quote dei punti di lavoro. I punti da raggiungere, dove la postura prevista richiede un'estensione del braccio, sono stati esclusi. Tutte le curve presentano un andamento simile tra loro.

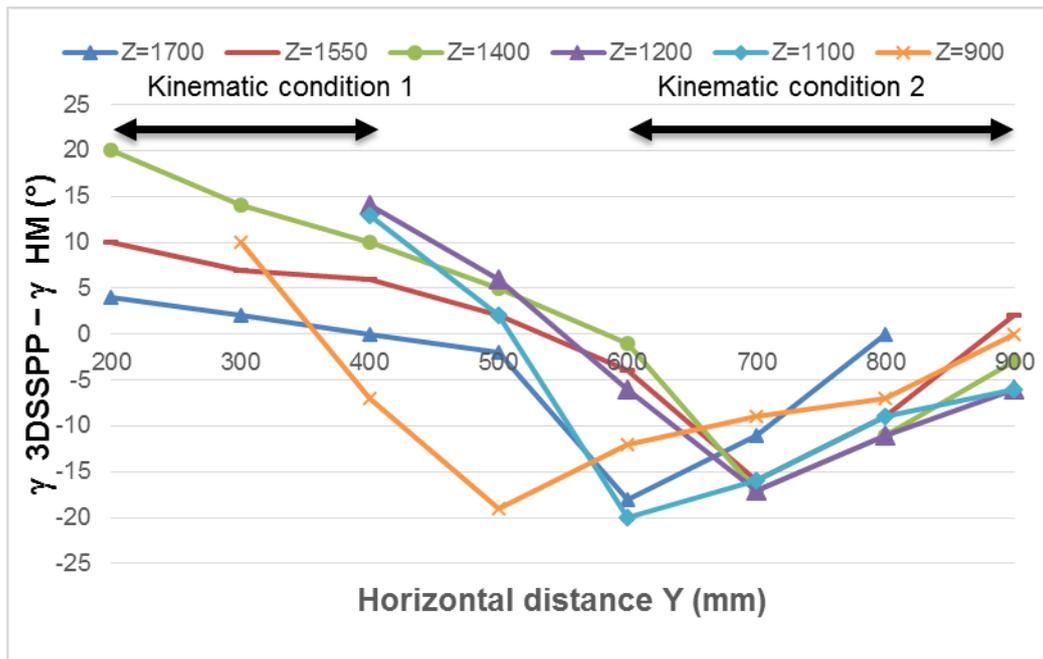


Figura 1.7: Differenza nell'angolo di elevazione del braccio calcolato con i due software

In condizione cinematica 1, l'assenza del g.d.l. di adduzione/abduzione della spalla implica che nello HM il movimento del braccio è vincolato in un piano ed è possibile che il manichino raggiunga punti di lavoro posti ad un'altezza del bacino con una minore elevazione del braccio. All'aumentare della distanza orizzontale dei punti di lavoro, la componente di abduzione del braccio decresce e, di conseguenza, la differenza tra le due posture previste diminuisce. La figura 1.8 mostra la riduzione della componente di abduzione della spalla quando la distanza orizzontale dei punti di lavoro dal corpo aumenta, per le diverse altezze dei punti di lavoro. L'angolo di abduzione è stato calcolato dall'angolo in 3D del 3DSSPP come precedentemente illustrato.

Il passaggio dalla condizione cinematica 1 alla condizione cinematica 2 è la ragione dell'improvviso aumento di differenza tra gli angoli stimati dai due

software: il manichino HM in condizione cinematica 2 raggiunge i punti di lavoro con le braccia distese.

Aumentando ulteriormente la distanza del punto di lavoro, la postura con le braccia distese dello HM assomiglia maggiormente alla postura prevista dal 3DSSPP:

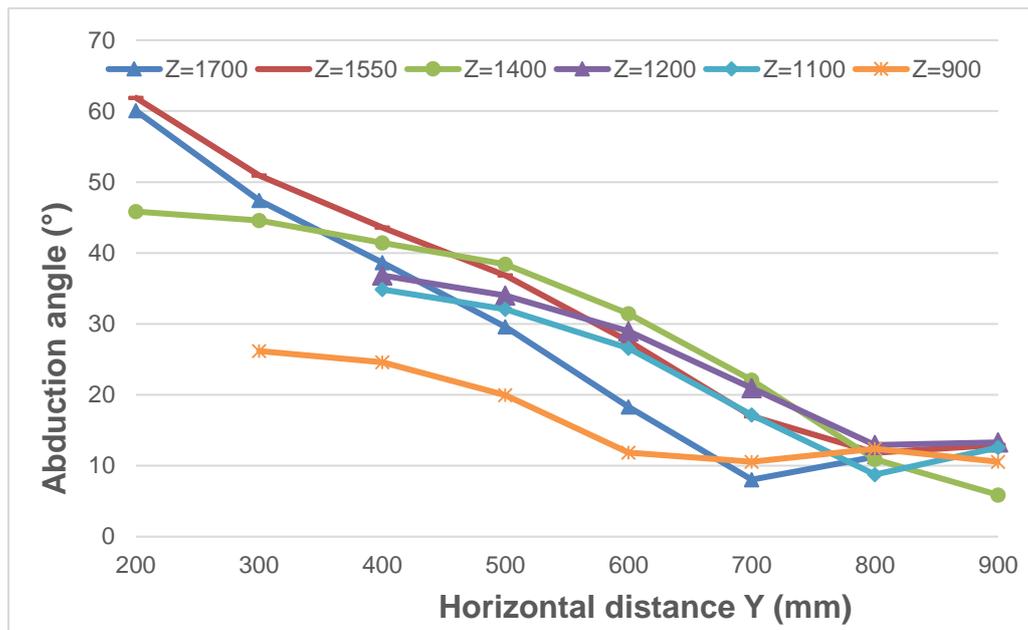


Figura 1.8: L'angolo di abduzione rispetto alla distanza orizzontale dei punti di lavoro da raggiungere per varie altezze verticali dal pavimento

Analisi biomeccaniche

Il 3DSSPP è stato usato per analizzare la biomeccanica delle posture previste con i due software. La tabella 1.6 mostra i risultati per i tre punti di lavoro che hanno evidenziato le maggiori differenze in termini di angoli ottenuti di flessione del tronco (α) ed elevazione del braccio (γ). I momenti riportati sul giunto L5/S1 ($M_{L5/S1}$) e sul giunto spalla (M_S) rappresentano i momenti di flessione/estensione agenti sui giunti. Per entrambi i giunti L5/S1 e spalla, la flessione/estensione è la componente più critica del vettore momento per il tipo di cinematica che caratterizza il modello 2D implementato nello HM. La differenza percentuale dei momenti ($\epsilon_M = (M_{HM} - M_{3DSSPP}) / M_{3DSSPP}$) è stata calcolata rispettivamente per i giunti L5/S1 ($\epsilon_{ML5/S1}$) e spalla (ϵ_{MS}). La tabella 1.6 riporta i valori di forza media e deviazione standard (SD) per la popolazione di riferimento fornita dal database di forza del 3DSSPP. Inoltre, è mostrato il percentile di forza associato, che quantifica

la popolazione che è capace di sopportare il carico sul relativo giunto (The University of Michigan, 1995).

Tabella 1.6: Angolari posturali ($^{\circ}$), momenti di flessione/estensione (Nm) e differenza percentuale sui giunti L5/S1 e spalla. Tutto confrontato con la media e la deviazione standard della distribuzione di forza della popolazione da cui è calcolato il percentile di forza capace di sopportare il carico sul relativo giunto.

Work point (mm)	Posture	L5/S1 (Flex/Ext)						Shoulder (Flex/Ext)					
		α ($^{\circ}$)	γ ($^{\circ}$)	$M_{L5/S1}$ (Nm)	$\epsilon_{ML5/S1}$ (%)	Mean (Nm)	SD	Cap (%)	M_S (Nm)	ϵ_{MS} (%)	Mean (Nm)	SD	Cap (%)
		Required	Population strength	Required	Population strength	Required	Population strength	Required	Population strength	Required	Population strength	Required	Population strength
Y=400, Z=900	HM	0	25	50		220	69	99	43		77	19	96
	3DSSPP	14	18	90	-44%	254	80	97	27	59%	72	18	99
Y=600, Z=1100	HM	1	64	80		223	70	97	65		78	19	74
	3DSSPP	14	44	115	-30%	250	79	96	47	38%	71	17	91
Y=600, Z=1200	HM	0	54	78		220	69	97	68		77	19	69
	3DSSPP	12	48	111	-30%	247	78	96	51	33%	70	17	87

Come prevedibile, $\epsilon_{ML5/S1}$ è sempre negativo a causa del minore angolo di flessione del tronco stimato dallo HM. Aumentando il piegamento del tronco, c'è un aumento nella componente di peso del busto da considerare nell'equazione di equilibrio. I momenti calcolati per le tre posture ottenute con lo HM sono minori del 30-44% dei corrispettivi valori di momento ottenuti con il 3DSSPP.

Invece, la tabella 1.6 mostra valori positivi di ϵ_{MS} per tutti i tre punti di lavoro analizzati. Nelle posture ottenute con lo HM, la minore flessione del tronco determina una distanza maggiore tra il giunto spalla e le mani, portando ad una sovrastima del momento calcolato. Nel punto di lavoro (Y = 400, Z= 900) la differenza nel momento calcolato è di quasi il 60%.

Sebbene la differenza può sembrare eccessiva, il relativo percentile di forza calcolato per le due posture previste non sembra evidenziare differenze significative per il giunto L5/S1. I momenti calcolati sono relativamente piccoli quando confrontati con il valore medio di riferimento della forza. Nelle code della distribuzione Gaussiana sono necessarie grandi differenze di momento per determinare un cambiamento significativo nel percentile di forza.

Per il giunto spalla, nei punti di lavoro posti ad una distanza orizzontale $Y=600$, è associata una maggiore differenza nel percentile di forza stimato tra le due posture simulate, sebbene questi punti non sono caratterizzati dalle più grandi differenze tra i momenti calcolati. Aumentando il braccio della forza applicata, il momento agente sul giunto spalla aumenta. Allontanandosi dalle code della distribuzione Gaussiana, le differenze dei momenti calcolati hanno un maggiore impatto sui relativi percentili di forza e come è ovvio che sia, il carico esterno applicato influenza il momento calcolato ed il percentile di forza. Ulteriori simulazioni sono state effettuate per gli stessi punti di lavoro ma variando il carico applicato alle mani; anche in questi casi la differenza percentuale tra i momenti calcolati dei due giunti non è variata, mentre la variazione nel percentile di forza è stata più o meno significativa a seconda del valore del momento calcolato rispetto al valore medio della distribuzione di forza. Nello specifico, più il momento calcolato è confrontabile con il valore medio della distribuzione di forza, più è influente la variazione sul percentile di forza. Viceversa, l'effetto di variazione sul percentile di forza è minore per le code della distribuzione di forza.

Come detto, la tabella 1.6 riporta le analisi biomeccaniche delle tre posture che mostrano sostanziali differenze posturali. Ma, dato che in tutti i casi lo HM sovrastima l'angolo di elevazione del braccio, è stato deciso di analizzare altri punti di lavoro allo scopo di completare e approfondire l'analisi biomeccanica.

Tabella 1.7: Angolari posturali ($^{\circ}$), momenti di flessione/estensione (Nm) e differenza percentuale sui giunti L5/S1 e spalla. Tutto confrontato con la media e la deviazione standard della distribuzione di forza della popolazione da cui è calcolato il percentile di forza capace di sopportare il carico sul relativo giunto.

Work point (mm)	Posture	L5/S1 (Flex/Ext)							Shoulder (Flex/Ext)					
		α ($^{\circ}$)	γ ($^{\circ}$)	$M_{L5/S1}$ (Nm)	$\epsilon_{M_{L5/S1}}$ (%)	Mean (Nm)	SD	Cap (%)	Required	M_S (Nm)	ϵ_{M_S} (%)	Mean (Nm)	SD	Cap (%)
		Required	Population strength	Required	Population strength	Required	Population strength	Required	Population strength					
Y=200, Z=1400	HM	0	2	27		220	69	99	19		64	16	99	
	3DSSPP	5	32	27	0%	225	71	99	13	46%	77	19	99	
Y=400, Z=1100	HM	0	11	48		220	69	99	36		72	18	97	
	3DSSPP	10	24	75	-36%	243	77	98	22	64%	64	16	99	
Y=400, Z=1550	HM	0	58	56		220	69	99	48		71	18	90	
	3DSSPP	3	64	61	-8%	227	72	89	37	30%	65	16	95	

In particolare, la tabella 1.7 mostra le analisi biomeccaniche per tre punti di lavoro in cui lo HM sottostima sia la flessione del tronco che l'angolo di elevazione del braccio. Sono stati scelti tre punti di lavoro in cui è stata associata una differente fascia di valutazione semaforica per l'angolo γ . Coerentemente con la tabella 1.6, la differenza percentuale $\epsilon_{M_{L5/S1}}$ è sempre negativa. Al contrario, nonostante il minore angolo di elevazione del braccio, ϵ_{M_S} continua ad essere positivo, ciò significa che i valori più alti di momento sul giunto spalla sono stati calcolati per le posture previste con lo HM. Questi risultati confermano che il momento calcolato sul giunto spalla è maggiormente correlato alla flessione del tronco, e di conseguenza alla distanza tra il giunto spalla e la posizione delle mani.

E' importante notare, che una delle maggiori limitazioni dell'approccio utilizzato per calcolare la richiesta di forza, nella maggior parte dei programmi DHM (incluso il 3DSSPP), è che essi considerano le componenti del momento

agente sulla spalla, separatamente ed indipendentemente tra loro stesse (Hodder, J.N. et al., 2015). Essi valutano il percentile di forza considerando la componente maggiore del vettore momento (che nei casi analizzati è la flessione/estensione nel piano sagittale). Questo approccio è particolarmente adatto al modello cinematico dello HM, dove le componenti di adduzione/abduzione e rotazione omerale sono trascurabili se confrontate con la componente di flessione/estensione. Invece, nelle posture previste con il 3DSSPP, le componenti di abduzione e rotazione della spalla possono essere confrontabili con quella di flessione/estensione, soprattutto per i punti di lavoro vicini al corpo dove l'abduzione della spalla è significativa (figura 1.6). Calcolando il vettore momento risultante sul giunto spalla, la differenza percentuale tra le posture previste con HM e 3DSSPP diminuisce significativamente. In linea con lo studio di Hodder et al. (2015), potrebbero essere ottenute valutazioni più accurate e conservative, se i software DHM considerassero il contributo combinato dei momenti calcolati nei diversi assi del giunto spalla.

Sebbene questa analisi è limitata ad una sola direzione di carico, i risultati mostrano che il manichino 2D può essere utile per una rapida valutazione nella fase iniziale di progettazione anche quando la postura simulata è usata per le analisi biomeccaniche. Ulteriori studi con diversi carichi e direzioni della forza potrebbero supportare ed integrare i risultati iniziali di questa analisi comparativa.

1.2.3 Conclusioni

Le tabelle con i valori angolari di flessione del tronco ed elevazione del braccio, ottenuti dalle simulazioni posturali nell'area di raggiungibilità davanti al manichino, forniscono importanti informazioni sul "costo ergonomico" associato alla postura. Le valutazioni a fasce semaforiche, associate ai valori angolari come definito dalle normative tecniche internazionali, potrebbero supportare l'ergonomo nelle valutazioni iniziali della fase di progetto.

Il confronto con un modello di riferimento per la letteratura come il 3DSSPP ha mostrato che un manichino semplificato in 2D, con un numero limitato di g.d.l. e la cinematica vincolata nel piano sagittale, potrebbe fornire indicazioni utili ed affidabili per indirizzare la progettazione. I risultati acquisiscono ancora più valore considerando che, questo semplice modello, può essere utilizzato mediante fogli di calcolo in ambiente Microsoft Excel, e può essere utilizzato anche da ergonomi senza particolari esperienze nella modellazione virtuale.

Le analisi biomeccaniche svolte sulle posture simulate con i due programmi hanno confermato l'importanza di un'accurata previsione posturale. L'approccio di calcolo statico della forza implementato in molti programmi DHM per la determinazione del percentile di forza considera indipendenti le componenti agenti sul giunto spalla. Questo approccio si adatta bene a manichini la cui cinematica è vincolata nel piano sagittale, dove le componenti di adduzione/abduzione e rotazione omerale sono trascurabili rispetto alla componente di flessione/estensione.

1.3 Utilizzo dello HM nella progettazione

In questo capitolo sono state descritte le potenzialità dei programmi DHM e l'importanza di ottenere i risultati output di questi strumenti in tempi brevi per seguire la realtà dinamica del contesto industriale, infatti è stato provato che l'accurata riproduzione della postura e del movimento umano nei software DHM è critica e richiede molto tempo (De Magistris, G., 2015; Woldstad, J.C., 2006).

Nel paragrafo precedente è stato validato lo HM per confronti con altri software che utilizzano un modello più complesso con un numero di g.d.l. maggiore. In questo paragrafo, invece, sarà descritto uno studio in cui sono state raccolte delle applicazioni di utilizzo dello HM per effettuare analisi di raggiungibilità di punti di lavoro con diversi manichini corrispondenti a tre percentili antropometrici.

Obiettivo di questo lavoro è di studiare le differenze dovute alle diverse antropometrie per la raggiungibilità di punti di lavoro e le potenzialità di uno strumento utilizzato per un rapido screening iniziale per stimare gli angoli posturali e i percentili antropometrici limite. I casi studio sono stati selezionati dalle postazioni di lavoro, modellate in ambiente virtuale, delle linee di produzioni di FCA e le operazioni di lavoro sono state replicate fisicamente in laboratorio.

1.3.1 Descrizione dello studio

Il software Siemens Teamcenter Visualization Mockup® v11.2 è stato usato per la modellazione dell'ambiente di lavoro della linea di montaggio. In questo ambiente è possibile utilizzare il tool JACK (Phillips, C. B., & Badler, N. I., 1988) per creare un modello umano in 3D allo scopo di studiare l'interazione dell'operatore virtuale con le postazioni di lavoro. A causa del tempo richiesto per posizionare il manichino ed impostare i parametri di simulazione, è di comune pratica limitare l'analisi all' "uomo medio", che è il manichino P50M (50° percentile antropometrico maschile), sebbene i problemi di raggiungibilità o di accessibilità possono essere

particolarmente critici per antropometrie limite come una donna molto bassa o un uomo molto alto.

Tre operazioni di montaggio sono state selezionate come potenzialmente critiche per la postura del tronco o dell'arto superiore. Queste operazioni, scelte come casi studi, sono state riprodotte attraverso test fisici in ErgoLab (laboratorio di ergonomia di FCA) utilizzando il telaio di un'automobile, allo scopo di verificare le posture ottenute con le simulazioni virtuali. Un gancio sollevatore permette la rotazione della vettura e la variazione dell'altezza di lavoro allo scopo di simulare le condizioni geometriche della linea di montaggio. Le operazioni di montaggio in laboratorio sono state effettuate da un operatore di sesso maschile, alto 1.73 m, che è corrispondente al manichino P50M.

La prima operazione selezionata è il montaggio dei tubi del sistema frenante nel passaruota. L'operazione consiste nel posizionamento sull'apposito supporto dei tubi del sistema frenante e di fissarli applicando una pressione con la mano. Nella stessa postazione di lavoro, successivamente, il sistema è fissato con due viti.

La figura 1.9 raffigura, sia in fisico che in virtuale, la postura dell'operatore per la raggiungibilità del punto di lavoro dove sono svolte le operazioni. Come può essere osservato, la postura di lavoro non è critica per il tronco ma potrebbe richiedere un'elevazione delle braccia portando le mani oltre l'altezza delle spalle.

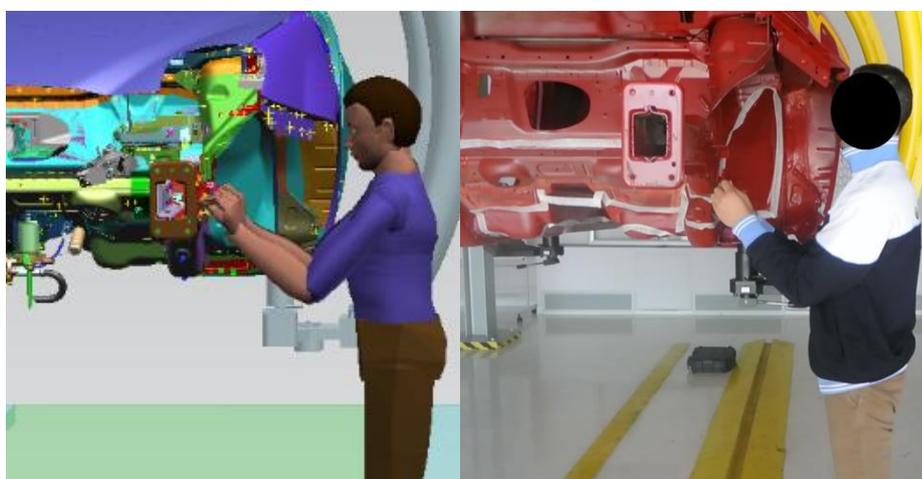


Figura 1.9: Modello virtuale e test fisico del caso studio del montaggio dei tubi del sistema frenante

Il secondo caso studio è relativo all'operazione di montaggio dell'antenna sul tetto della vettura: l'operatore introduce i cavi dell'antenna nell'apposito alloggiamento e fissa manualmente l'antenna con un'operazione di avvitatura.

Questa postura di lavoro è invece critica, per via della coda della vettura che limita la raggiungibilità sul tetto (figura 1.10).

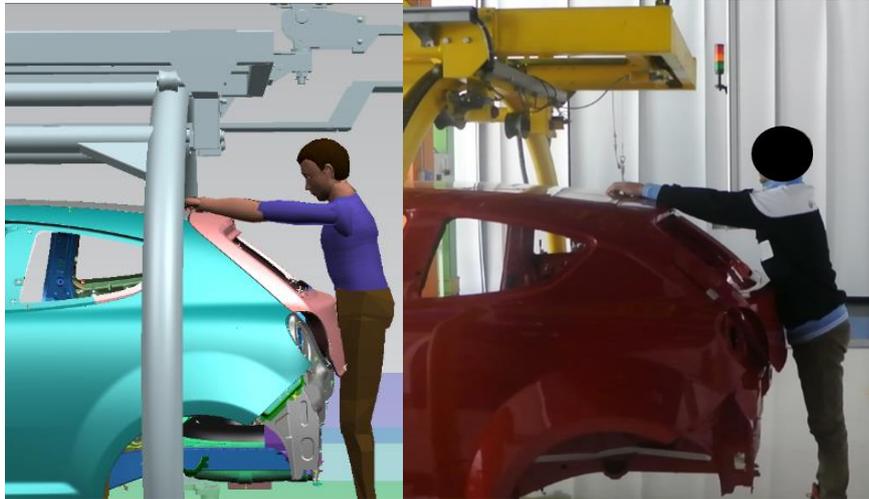


Figura 1.10: Modello virtuale e test fisico del caso studio del montaggio dell'antenna

La terza operazione selezionata consiste nell'applicazione della guarnizione inferiore nel vano porta: l'operatore posiziona la guarnizione e la stende calzandola lungo l'intero perimetro inferiore della porta. L'operazione richiede la flessione del tronco dell'operatore allo scopo di esercitare la pressione richiesta per il montaggio della guarnizione (figura 1.11).

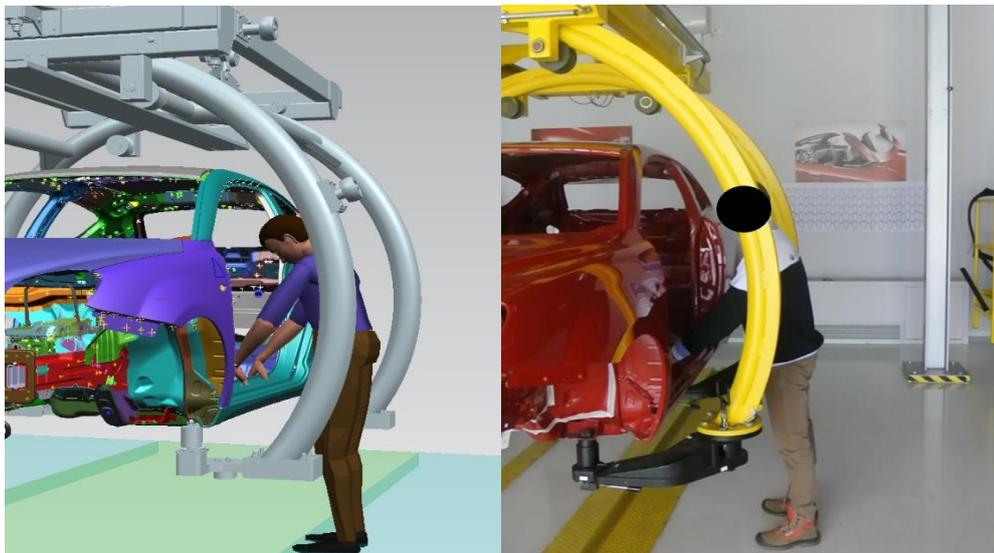


Figura 1.11: Modello virtuale e test fisico del caso studio dell'applicazione della guarnizione

Per la progettazione delle postazioni di lavoro, le linee guida ergonomiche indicano che devono essere verificati sia l'uomo medio che gli utenti limite che possono essere assegnati alla postazione di lavoro. Questo richiederebbe di considerare il manichino P50M, ma anche i manichini P5F e P95M per la valutazione di una postazione di lavoro.

In questo lavoro, sono stati confrontati i risultati delle simulazioni posturali per i tre casi studio e le tre antropometrie dei manichini virtuali. I manichini sono stati generati con le misure antropometriche di riferimento come indicato nella normativa tecnica (ISO 7250-2) per la popolazione di interesse. Per questo lavoro è stata scelta la popolazione italiana:

- P50 M (statura 1719 mm)
- P5 F (statura 1490 mm)
- P95 M (statura 1834 mm)

1.3.2 Risultati e discussioni

Lo HM permette all'ergonomo di visualizzare la postura dell'operatore nel piano frontale, sagittale e trasversale, ma anche di calcolare il valore di flessione del tronco e di elevazione del braccio. Gli angoli posturali sono colorati con le valutazioni semaforiche come indicato dalle normative tecniche internazionali ISO 11226 e UNI EN 1005/4.

La tabella 1.8 riassume le coordinate orizzontali (Y) e verticali (Z) dei punti di lavoro dei tre casi studio analizzati e per ognuno di essi, gli angoli posturali stimati per i tre differenti manichini. La valutazione ergonomica del rischio a fasce semaforiche è stata fornita per ogni angolo posturale calcolato, come riportato in seguito:

- $0^\circ \leq \alpha, \gamma < 20^\circ$ condizione accettabile (fascia verde)
- $\alpha, \gamma < 0^\circ, 20^\circ \leq \alpha, \gamma < 60^\circ$ condizione da verificare (fascia gialla)
- $\alpha, \gamma \geq 60^\circ$ condizione non accettabile (fascia rossa)

Tabella 1.8: Angoli posturali e relative valutazioni ergonomiche semaforiche

Punto di lavoro (mm)		Manichino	Flessione del tronco (α)	Elevazione del braccio (γ)
1	Y=500; Z=1400	P50 M	0°	47°
		P5 F	0°	91°
		P95 M	0°	30°
2	Y=800; Z=1400	P50 M	14°	105°
		P5 F	42°	166°
		P95 M	9°	91°
3	Y=500; Z=800	P50 M	18°	47°
		P5 F	11°	57°
		P95 M	22°	45°

Per il primo caso studio, il punto di lavoro è rappresentato da una distanza orizzontale di 500 mm e una distanza verticale dal suolo di 1400 mm. La figura 1.12 mostra da sinistra a destra le posture simulate con i manichini P50M, P5F e P95M. L'interfaccia grafica dello HM mostra la vista nel piano sagittale del manichino selezionato.

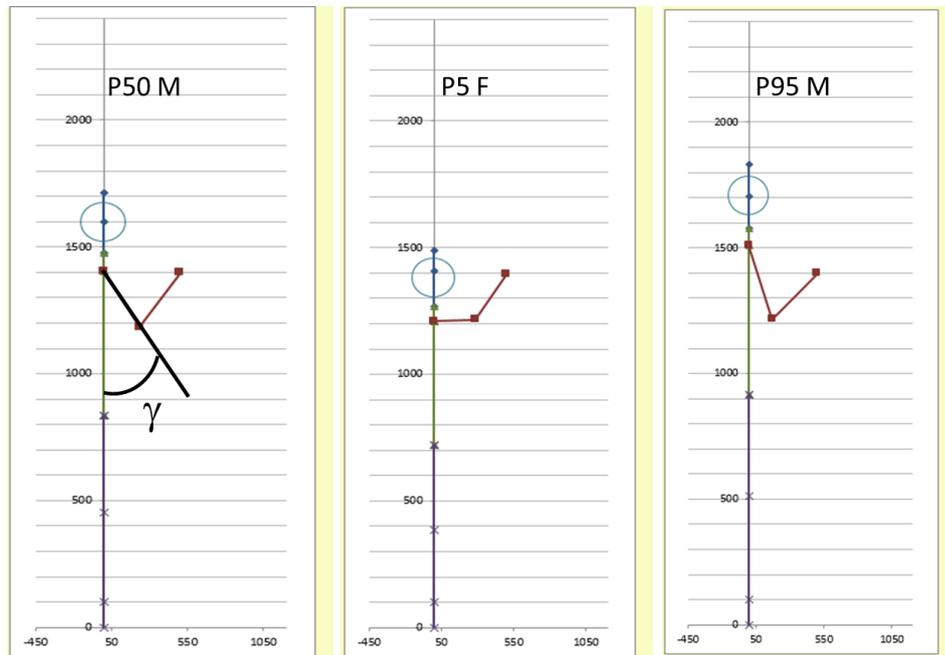


Figura 1.12: Postura prevista con i differenti manichini - caso studio 1

Il confronto tra le tre antropometrie mostra diverse posture per raggiungere con le mani la destinazione impostata. Per nessun manichino si nota flessione del tronco per raggiungere il punto di lavoro, ma la postura del braccio è differente tra i tre percentili:

- P50M: $\alpha \approx 0^\circ$; $\gamma = 47^\circ$
- P5F: $\alpha \approx 0^\circ$; $\gamma = 91^\circ$
- P95M: $\alpha \approx 0^\circ$; $\gamma = 30^\circ$

L'angolo di elevazione del braccio per il P5F è ovviamente maggiore, e questo porta ad una postura inaccettabile dell'arto superiore. Per i percentili maschili, il grado di elevazione del braccio porta ad un codice giallo, quindi la postura deve essere considerata anche rispetto al tempo relativo alla durata del compito lavorativo. Inoltre, per il percentile più alto, si necessita una verifica dei requisiti di visibilità a causa dell'aumento della distanza tra gli occhi ed il punto di lavoro.

Per il secondo caso studio, il punto di lavoro si trova a una distanza orizzontale di 800 mm e una distanza verticale di 1400 mm.

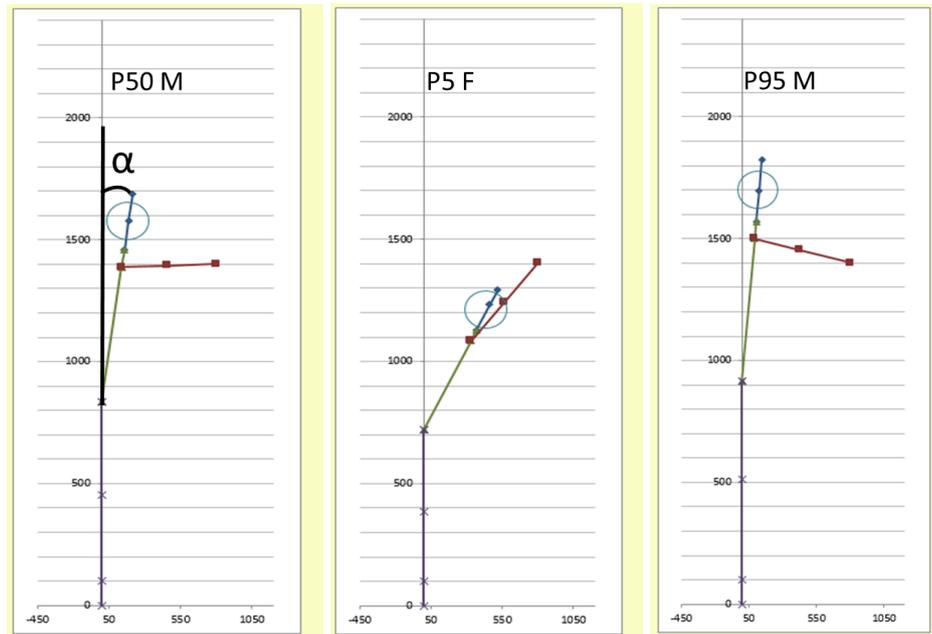


Figura 1.13: Postura prevista con i differenti manichini - caso studio 2

Il punto di lavoro è più distante dal corpo per via della vettura che fa da ostacolo, e per questo motivo, la raggiungibilità è più difficile (figura 1.13). Nel caso in esame, la raggiungibilità del punto di lavoro richiede sia la flessione del tronco che l'elevazione del braccio per tutti e tre i percentili:

- P50M: $\alpha = 14^\circ$; $\gamma = 105^\circ$
- P5F: $\alpha = 42^\circ$; $\gamma = 166^\circ$
- P95M: $\alpha = 9^\circ$; $\gamma = 91^\circ$

Sebbene l'elevazione del braccio eccede i limiti raccomandati per tutti i percentili (condizione inaccettabile, fascia rossa), nel caso del manichino P5F anche la flessione del tronco appare potenzialmente critica (fascia gialla).

Infine, per l'ultimo caso studio, il punto di lavoro si trova ad una distanza orizzontale di 500 mm e una distanza verticale dal suolo di 800 mm.

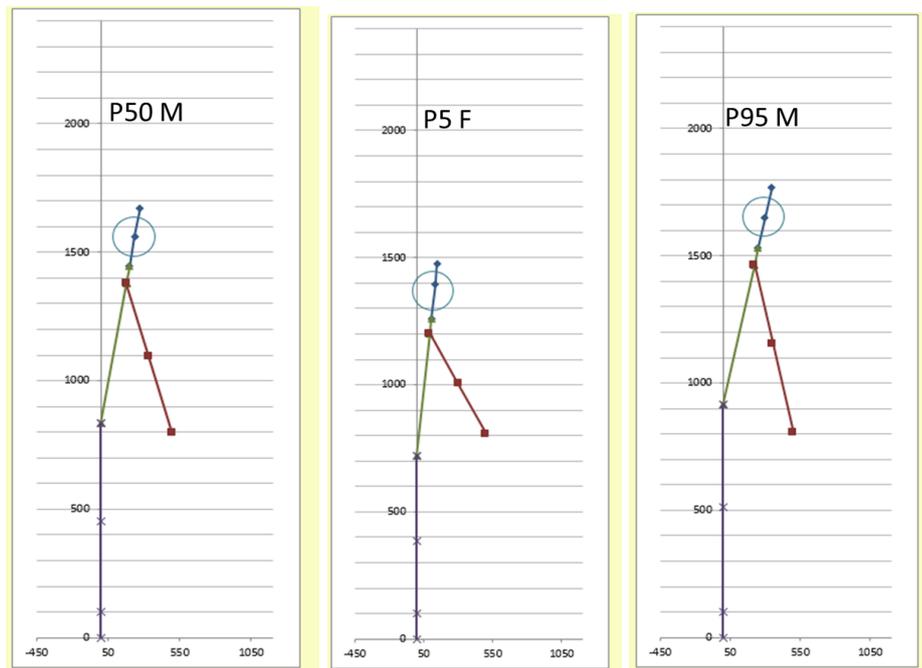


Figura 1.14: Postura prevista con i differenti manichini - caso studio 2

Questo punto di lavoro ha una distanza verticale minore e per questo motivo è necessario un certo grado di flessione del tronco (figura 1.14). Nello specifico, per la postura prevista gli angoli sono:

- P50M: $\alpha = 18^\circ$; $\gamma = 47^\circ$
- P5F: $\alpha = 11^\circ$; $\gamma = 57^\circ$
- P95M: $\alpha = 22^\circ$; $\gamma = 45^\circ$

Anche nel terzo caso studio, al manichino P5F è richiesta una significativa elevazione del braccio e rappresenta il caso limite. Infatti, per problemi di raggiungibilità, le linee guida per la progettazione delle postazioni di lavoro indicano spesso la verifica del manichino P5F. Comunque, la flessione del tronco è maggiore nel caso del manichino P95M, dato che il punto di lavoro è particolarmente basso, per questo motivo è più difficilmente raggiungibile da un operatore più alto. Questo aspetto, sottolinea l'importanza di verificare sempre la raggiungibilità dei percentili estremi della popolazione per cui si intende progettare.

Questi esempi e i risultati sintetizzati in tabella 1.8 evidenziano i benefici di uno screening iniziale con un rapido strumento per la verifica del confort posturale dei percentili limite, per i quali i problemi di raggiungibilità e accessibilità sono notoriamente più critici.

1.3.3 Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro è indagare sulle differenze dovute all'antropometria nelle analisi posturali delle postazioni di lavoro con il valore aggiunto dell'utilizzo di un semplice strumento di simulazione per la verifica degli angoli posturali dei percentili limite, specialmente nel caso in cui la linea di produzione, per vincoli tecnici, non può essere adattata all'antropometria dell'operatore.

Sono stati selezionati tre casi studio dalla modellazione virtuale delle linee di produzione FCA e tre operazioni di montaggio sono state designate per essere riprodotte fisicamente in laboratorio per verificare la postura prevista del manichino P50M. Lo HM è stato poi usato per il confort posturale delle postazioni scelte con i percentili antropometrici P5F e P95M, per i quali i problemi di raggiungibilità ed accessibilità sono spesso più critici.

La semplicità di utilizzo e la velocità con cui si possono ottenere risultati fanno di questo modello multibody uno strumento molto utile nella progettazione iniziale delle postazioni di lavoro. Infatti, l'utilizzo di un modello 2D nelle fasi preliminari di progettazione, rispetto a modelli più complessi, permette di effettuare un numero di analisi molto più elevato nella stessa unità di tempo, consentendo di individuare le potenziali criticità ergonomiche, che possono essere studiate, approfondite e mitigate già in questa fase. Difatti, nella fase preliminare della progettazione di una linea produttiva, l'impatto economico delle modifiche è basso o assente, di conseguenza sono numerose le modifiche che possono essere studiate virtualmente per migliorare l'efficienza di una postazione di lavoro. Tali modifiche possono non riguardare l'ergonomia, ma provenire anche da altri enti che lavorano al fine di migliorare l'efficienza del processo, come ad esempio: logistica, layout, sicurezza, etc. Quindi, uno strumento di modellazione in 2D permette di rispondere in tempi brevi alle modifiche proposte, fornendo le necessarie valutazioni ergonomiche. Inoltre, nel caso in cui la linea di produzione già esista e non possa subire modifiche, la valutazione posturale con manichini di differente antropometrie può supportare anche il processo di allocazione degli operatori alle diverse postazioni di lavoro.

1.4 Mappature di angoli posturali in un piano di raggiungibilità normalizzato

In questo paragrafo sarà presentato un metodo per la generazione di mappature degli angoli posturali per una rapida valutazione del rischio posturale per operazioni di raggiungibilità, successivamente le coordinate dei punti di lavoro sono state normalizzate rispetto a delle misure antropometriche caratteristiche del relativo percentile. Nel piano normalizzato, il confort posturale può essere stimato per

operatori di diverse stature una volta che le coordinate del punto di lavoro sono scalate per tenere in conto l'antropometria del lavoratore. Come discusso nei paragrafi precedenti, nella realtà dinamica dei contesti industriali sono sempre ricercati strumenti semplici e di veloce utilizzo per guidare la progettazione delle postazioni di lavoro. Le mappature, generate con il metodo descritto in questo paragrafo, potrebbero rappresentare un valido e intuitivo supporto all'ergonomo per guidare la progettazione di postazioni di lavoro ergonomiche.

1.4.1 Descrizione dello studio

Ottenimento degli angoli posturali

Come primo passo, in questo lavoro sono stati ottenuti gli angoli posturali di flessione del tronco e di elevazione del braccio delle operazioni di raggiungibilità con il 3DSSPP che sono state usate come confronto per la validazione dello HM (§1.2).

Il National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) è il database antropometrico di riferimento del 3DSSPP. Il software permette la creazione di manichini personalizzabili attraverso tecniche di "scalatura" e di selezionare i percentili più usati in progettazione. Per questo lavoro sono stati scelti i P5, P50 e P95 maschili.

I punti di lavoro per cui sono state effettuate le previsioni posturali, e successivamente calcolati gli angoli posturali di interesse, sono gli stessi punti della griglia appartenenti al piano scelto e definito nel §1.2.1. I valori angolari di flessione del tronco (α) e di elevazione del braccio (γ) definiti dalle normative tecniche ISO 11226, UNI EN 1005-4 sono stati ottenuti per i tre percentili antropometrici scelti.

Estensione delle mappature

Nella seconda parte del lavoro sono stati utilizzati dei metodi di interpolazione per estendere i valori degli angoli posturali (calcolati per la griglia di punti simulati) ad una griglia più fitta di valori. MATLAB è stato utilizzato per interpolare i valori degli angoli posturali all'interno del piano di raggiungibilità e, in una fase successiva, per creare le superfici degli angoli posturali con diversi numeri di nodi. La densità della griglia in output può essere scelta a seconda del grado di dettaglio richiesto.

In questo lavoro sono state usate griglie con diverso numero di dati in input e diversi metodi di interpolazione. Nel dettaglio, sono state usate tre griglie di diversa dimensione: 3×7 (21 punti di lavoro), 4×7 (28 punti di lavoro), and 5×7 (35 punti di lavoro) e sono state usate interpolazioni di tipo lineare e non-lineare.

Le figure 1.15 e 1.16 mostrano due differenti superfici ottenute per l'angolo di elevazione del braccio. In particolare, la figura 1.15 rappresenta la griglia iniziale acquisita dalle simulazioni di raggiungibilità; questa griglia è composta da 21 punti di lavoro, di dimensione 3×7 . La figura 1.16 mostra, invece, una griglia più fitta di 221 punti interpolati, di dimensione 17×13 . Le superfici 3D permettono di valutare l'andamento degli angoli posturali nel piano di raggiungibilità scelto per le simulazioni ($X = 200\text{mm}$). Ogni nodo della griglia corrisponde ad un valore degli angoli posturali analizzati. Una scala colorata permette una semplice quantificazione dell'angolo posturale.

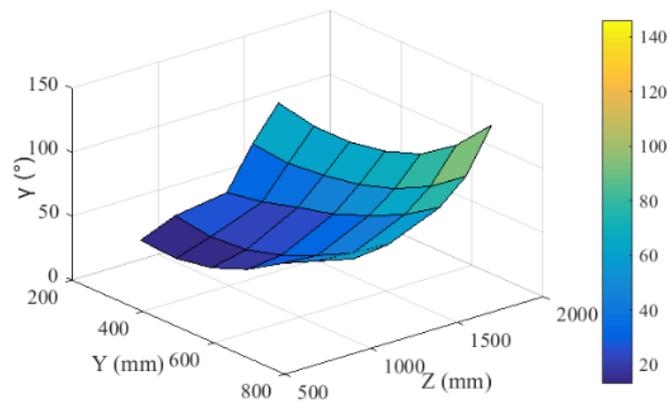


Figura 1.15: Superficie iniziale 3D. Valori dell'angolo di elevazione del braccio (γ) per la griglia iniziale 3×7 dei punti di lavoro nel piano di raggiungibilità

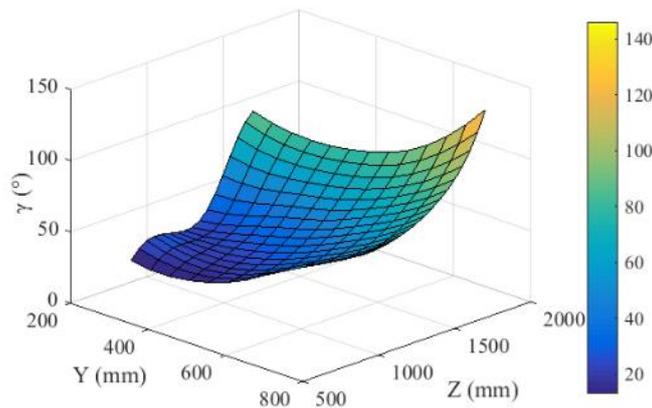


Figura 1.16: Superficie interpolata 3D. Valori dell'angolo di elevazione del braccio (γ) per la griglia interpolata 17×13 dei punti di lavoro nel piano di raggiungibilità

Normalizzazione del piano di raggiungibilità

Nella terza e ultima parte di questo lavoro, le mappature degli angoli posturali sono state normalizzate rispetto alle misure antropometriche caratteristiche dei manichini. Nello specifico, la statura e la lunghezza totale dell'arto superiore del manichino sono state usate per normalizzare, rispettivamente, l'altezza del punto di lavoro dal suolo e la distanza orizzontale del punto di lavoro. A questo proposito, le misure antropometriche dei tre percentili sono state prelevate direttamente dal 3DSSPP allo scopo di mantenere la coerenza tra i modelli antropometrici. Nel piano normalizzato, gli angoli posturali possono essere stimati per lavoratori con diverse antropometrie, una volta che le coordinate dei punti di lavoro sono scalati per tenere in considerazione l'antropometria dei lavoratori.

1.4.2 Risultati e discussioni

Numero di nodi della griglia e metodo di interpolazione

Per la validazione del metodo sono stati effettuati confronti tra gli angoli posturali ottenuti dalle interpolazioni e i valori direttamente ricavati dalle simulazioni posturali. Per i confronti sono stati scelti come "punti di controllo" dei punti di lavoro diversi dalla griglia inizialmente mappata. I "punti di controllo" sono stati selezionati scegliendo i punti più lontani dalla griglia input allo scopo di evidenziare le maggiori differenze.

La figura 1.17 mostra le differenze tra i valori interpolati e quelli di riferimento (3DSSPP) degli angoli di flessione del tronco ed elevazione del braccio nel caso di griglia di dimensione 3×7 . I due grafici corrispondono a metodi di interpolazione lineare e spline.

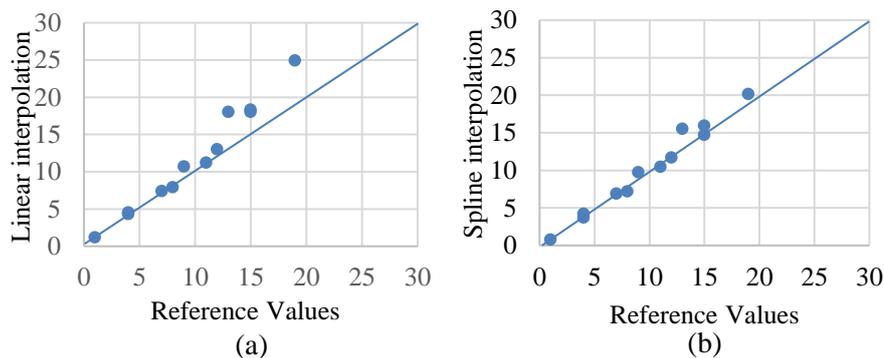


Figura 1.17: Correlazione tra i valori interpolati dell'angolo di flessione del tronco usando un'interpolazione lineare (figura 1.15a) e un'interpolazione spline (figura 1.15b) per una griglia iniziale input di dimensione 3×7

Nei grafici, la bisettrice indica la correlazione perfetta tra i valori angolari interpolati e di riferimento. In tabella 1.9 è mostrato il valore del coefficiente di determinazione R^2 per ogni caso di interpolazione (variando il numero dei nodi ed il metodo di interpolazione). Il coefficiente di determinazione R^2 è definito come:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}$$

Dove:

- SS_{res} è la devianza residua = $\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})$
- SS_{tot} è la devianza totale = $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})$

Nel presente lavoro:

- y_i sono i valori ottenuti dall'interpolazione
- \hat{y} sono i valori di riferimento
- \bar{y} è la media dei valori interpolati

R^2 assume valori maggiori per l'angolo di elevazione del braccio rispetto all'angolo di flessione del tronco per un fissato numero di nodi input. La ragione potrebbe essere attribuita ai valori di flessione del tronco che assumono valori minori e variano in un intervallo minore rispetto all'elevazione del braccio, di conseguenza un errore nella flessione del tronco ha un peso percentuale maggiore ed un impatto maggiore sul calcolo del coefficiente R^2 .

Come prevedibile, la tabella 1.9 mostra una correlazione migliore nei casi di griglie con un numero di nodi maggiore e metodi di interpolazione non lineare. Per questo lavoro, quindi le mappature angolari sono state ottenute usando una griglia input di dimensione 5×7 ed una interpolazione di tipo spline.

Tabella 1.9: Valori R^2 per differenti metodi di interpolazione e diversi numeri di nodi in input

Angoli posturali	Metodi di interpolazione	Nodi in input (3×7)	Nodi in input (5×7)
α	Linear	0.85	0.97
	Spline	0.97	0.98
γ	Linear	0.95	0.97
	Spline	0.99	0.99

Mappe posturali

Dopo aver scelto il numero di nodi e il tipo di interpolazione più adatto, gli angoli di flessione del tronco (α) e di elevazione del braccio (γ) sono stati mappati per i tre percentili selezionati. Le figure 1.18 e 1.19 mostrano la mappa colorata dei due angoli posturali per il P50 maschile.

La figura 1.18 mostra i valori di flessione del tronco. Come prevedibile, la flessione del tronco aumenta con la distanza orizzontale del punto da raggiungere. Nello specifico, i valori massimi di α sono ottenuti quando la distanza orizzontale è massima e la distanza verticale dei punti di lavoro è al limite del piano di raggiungibilità analizzato ($Z=900\text{mm}$, $Z=1700\text{mm}$). Invece, per i punti di lavoro più vicini al corpo, α è maggiore nei punti di lavoro che presentano minori distanze dal suolo.

La figura 1.19 mostra l'angolo di elevazione del braccio (γ). I valori angolari crescono quando aumentano sia la distanza orizzontale, che quella verticale. Il valore minimo e il valore massimo sono negli angoli opposti della mappa.

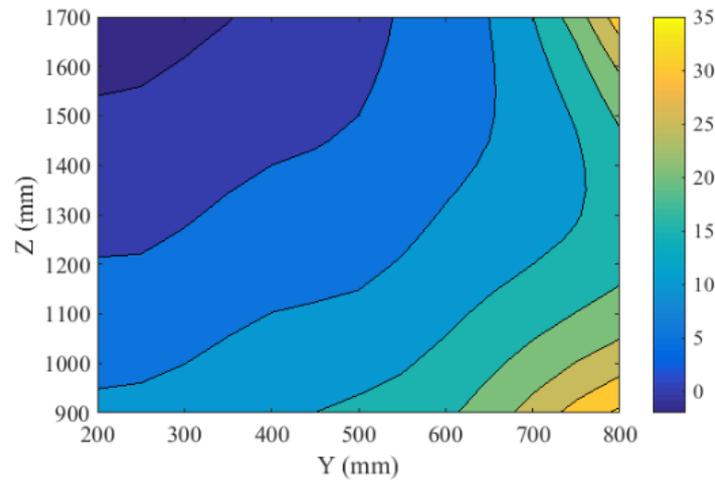


Figura 1.18: Mappa colorata dell'angolo di flessione del tronco (α) di un P50 maschio nel piano di raggiungibilità

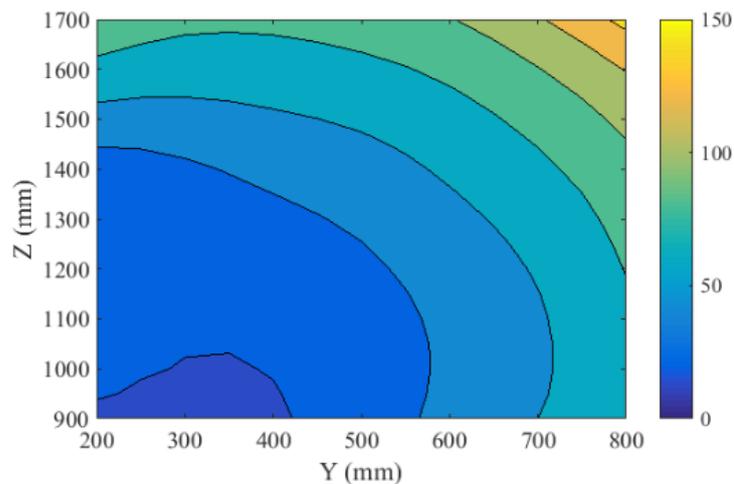


Figura 1.19: Mappa colorata dell'angolo di elevazione del braccio (γ) di un P50 maschio nel piano di raggiungibilità

Il confronto delle mappature degli angoli posturali tra i tre percentili mostra differenze significative a causa dell'antropometria. Come prevedibile, lo stesso punto di lavoro è raggiunto con differenti posture dai tre manichini. Sebbene lo stesso punto di lavoro determina diversi valori angolari, le mappe posturali dei differenti percentili presentano una forma simile. Nello specifico, si è osservato che manichini di diversa statura raggiungono un punto di lavoro approssimativamente allo stesso modo quando le coordinate di questi ultimi sono scalate rispetto le misure antropometriche del manichino. Per questo motivo, è stato studiato e

proposto un metodo per normalizzare, rispetto a delle misure antropometriche, le mappe posturali dei diversi percentili.

Mappe normalizzate

Nella seconda parte del lavoro, le coordinate Z di altezza verticale dei punti di lavoro sono state normalizzate rispetto la statura del manichino, mentre le coordinate Y di distanza orizzontale rispetto alla lunghezza totale del braccio.

Le figure 1.20 e 1.21 mostrano due mappature degli angoli posturali nel piano di raggiungibilità normalizzato. Queste mappe sono state colorate seguendo uno schema semaforico come specificato dalle normative tecniche (ISO 11226, UNI EN 1005-4), seguendo gli intervalli angolari indicati nei paragrafi precedenti.

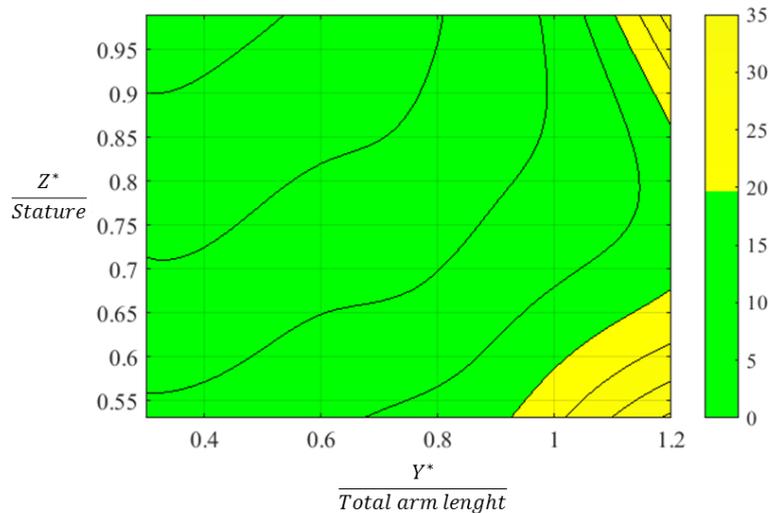


Figura 1.20: Valutazione semaforica dell'angolo di flessione del tronco (α) di un P50 maschio nel piano di raggiungibilità normalizzato

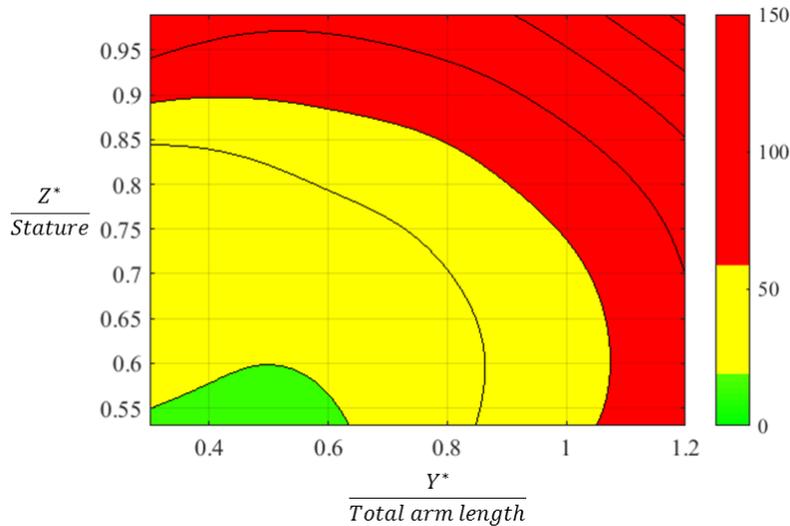


Figura 1.21: Valutazione semaforica dell'angolo di elevazione del braccio (γ) di un P50 maschio nel piano di raggiungibilità normalizzato

La colorazione con schema semaforico permette una rapida valutazione posturale. Nella fase di progetto, l'ergonomo potrebbe usare queste mappature per effettuare controlli di raggiungibilità e stimare il comfort posturale di una certa operazione lavorativa ancora prima che essa sia stata industrializzata o inserita in un ambiente virtuale.

Infine, sono state confrontate le mappature degli angoli posturali, ottenute nel piano normalizzato per i tre percentili antropometrici. Nella figura 1.22 sono stati confrontati alcuni punti di lavoro definiti nel piano normalizzato. In figura 1.22 è stata fissata l'altezza dei punti di lavoro all'82% della statura del manichino (approssimativamente l'altezza della spalla), mentre l'altezza orizzontale è mostrata sulle ascisse come rapporto rispetto alla lunghezza del braccio. Le tre curve rappresentano i valori dell'angolo di flessione del tronco per i manichini P5, P50, P95 maschili. I valori angolari sono molto simili tra i tre percentili analizzati, e le differenze sono contenute entro un massimo di 3°

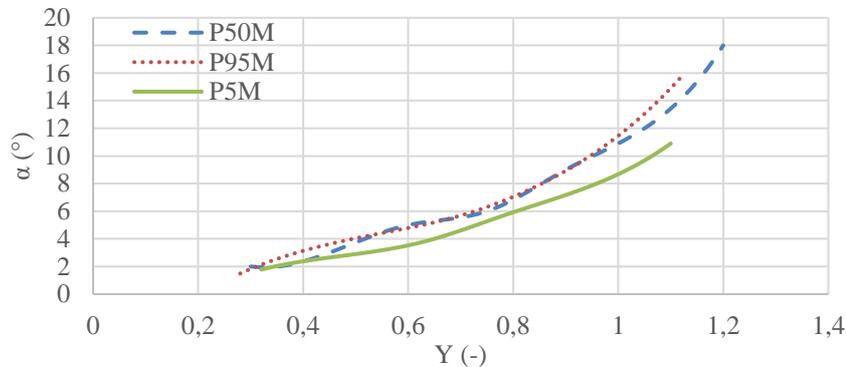


Figura 1.22: Confronto degli angoli di flessione del tronco tra i 3 percentili. I punti di lavoro sono all'altezza della spalla, mentre la coordinata Y è scalata rispetto alla lunghezza del braccio

Anche nella figura 1.23 sono mostrati i confronti tra i valori angolari dei tre percentili, ma in questo caso il confronto riguarda l'angolo di elevazione del braccio e la distanza verticale dei punti di lavoro è stata fissa all'incirca con la statura del relativo manichino antropometrico.

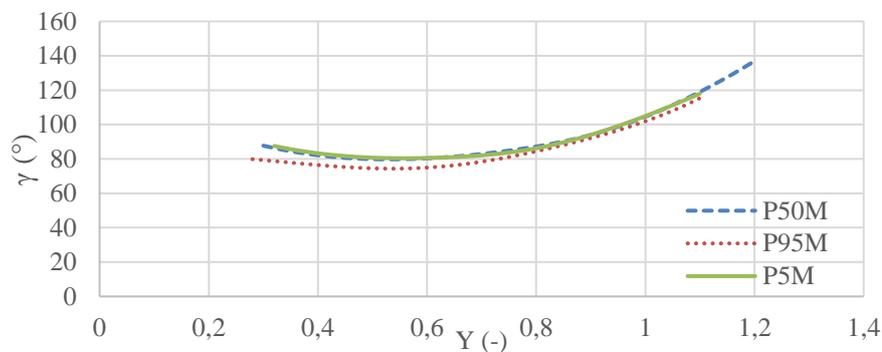


Figura 1.23: Confronto degli angoli di elevazione del braccio tra i 3 percentili. I punti di lavoro sono posti ad un'altezza circa pari alla statura, mentre la coordinata Y è scalata rispetto alla lunghezza del braccio

Per semplicità, le figure 1.22 e 1.23 mostrano i punti di lavoro ad altezze fissate, ma sono stati effettuati anche ulteriori confronti per altri punti di lavoro nel piano di raggiungibilità. Questi risultati confermano che le mappature degli angoli posturali, se normalizzate rispetto alla statura ed alla lunghezza del braccio dei manichini, possono essere usate per ogni percentile con un'approssimazione accettabile.

1.4.3 Conclusioni

Con questo lavoro è stato condotto uno studio preliminare sul confort posturale durante operazioni di raggiungibilità ed è stato proposto un metodo per ottenere mappature complete per un piano di raggiungibilità normalizzato.

Nel piano normalizzato, gli angoli di flessione del tronco ed elevazione del braccio possono essere calcolati per lavoratori di diversa statura, una volta che le coordinate dei punti di lavoro sono state scalate per tenere in considerazione l'antropometria dei lavoratori. Lo schema di colorazione semaforico è stato usato per definire le diverse zone di confort posturale come indicato dalle normative tecniche internazionali, così da rendere le mappature un supporto affidabile e facilmente consultabile da un ergonomo.

Il metodo proposto è stato applicato utilizzando come dati in input gli angoli stimati da simulazioni di raggiungibilità con strumenti DHM. Ma potrebbe essere applicato anche con i valori angolari ottenuti da test di raggiungibilità sperimentali. In questo caso le mappature diverrebbero ancora più affidabili, e l'interpolazione acquisirebbe ancora più importanza, poiché permetterebbe di utilizzare una griglia ridotta di dati sperimentali, risparmiando in questo modo tempo e costo.

Capitolo 2

Definizione e analisi di una banca dati antropometrica a supporto della progettazione

2.1 Introduzione

Nel corso della propria giornata lavorativa, le persone interagiscono con vari strumenti e prodotti, seppur in modi differenti, a seconda della propria mansione e del luogo di lavoro. Un'interazione appropriata tra persone, prodotti e luoghi di lavoro richiede, appunto, che i prodotti e i luoghi di lavoro debbano essere adattati nel rispetto dei principi ergonomici all'antropometria delle persone (Mokdad, M., 2002; Pentikis, J., Lopez, M. S., & Thomas, R. E., 2002).

L'antropometria è un'importante area della scienza umana che riguarda le misure dell'altezza, del peso e delle dimensioni delle varie parti del corpo. L'antropometria esamina anche come queste misurazioni variano in determinate circostanze, ad esempio per gruppo di età, etnia, sesso e nazionalità. Le differenze antropometriche tra diverse etnie sono maggiori rispetto alle differenze tra le persone di nazioni diverse e stessa etnia, tuttavia spesso anche queste differenze non sono trascurabili, come è stato dimostrato confrontando i dati antropometrici delle persone di quattro regioni diverse dell'Asia orientale (Lin, Y. C., Wang, M. J. J., & Wang, E. M., 2004). I dati antropometrici sono utilizzati anche nella ricerca antropologica e medica, infatti, l'antropometria è un'area importante della scienza umana che permette di indicare lo stato di salute delle persone (Khadem, M. M., & Islam, M. A., 2014).

Sebbene la perfetta interazione tra un prodotto o una postazione di lavoro e un utente non è sempre possibile, l'integrazione dei dati antropometrici nella progettazione ergonomica garantisce un miglioramento delle condizioni di utilizzo o di lavoro (Pheasant, S., & Haslegrave, C. M., 2016), che contribuisce ad elevare

le prestazioni lavorative e la produttività. Invece, considerazioni errate o l'omissione di dati antropometrici nelle progettazioni di prodotti o postazioni di lavoro possono provocare disagi psicologici legati al lavoro, affaticamento fisico e dolori o lesioni, con conseguenti insorgenze di disturbi o malattie muscoloscheletriche (Bernard, B. P., & Putz-Anderson, V., 1997; National Research Council, 2001). Di conseguenza, l'uso dei dati antropometrici è essenziale per progettare un ambiente di lavoro sicuro, confortevole e produttivo.

L'attuale riferimento internazionale dei dati antropometrici è la ISO 7250-1/2 (2008, 2009) che riporta una collezione di analisi statistiche per misurazioni antropometriche svolte in diverse nazioni. Per quanto riguarda la popolazione italiana, il riferimento nella normativa è la campagna antropometrica: "Italia si Misura" (Masali, 2011), svolta sulle spiagge italiane, nelle città di Ancona e Napoli tra il 1990-1991.

Dalla mancanza di un database antropometrico recente, aggiornato, affidabile e rappresentativo della popolazione lavorativa italiana, scaturisce la necessità di effettuare una nuova campagna di misurazione. Il progetto: "La Fabbrica si Misura" si pone come obiettivo la stima delle misure antropometriche della popolazione lavorativa italiana per fornire un supporto alla progettazione. Infatti, al giorno d'oggi, nel contesto dell'Industria 4.0, l'uomo è al centro della progettazione e l'obiettivo è quello di creare un ambiente di lavoro confortevole e adatto alle sue esigenze. Inoltre, nel database di riferimento di normativa mancano alcune misure antropometriche che sono di particolare interesse per la generazione di manichini virtuali adoperati per le valutazioni ergonomiche delle postazioni di lavoro.

Il progetto è nato dalla collaborazione tra Fiat Chrysler Automobiles (FCA), il Politecnico di Torino e l'Istituto Nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavoro (INAIL). Lo studio consiste nello sviluppo di una procedura per l'acquisizione dei dati antropometrici di almeno 6000 soggetti (3000 per genere), di età compresa tra i 18 e i 65 anni, appartenenti alla popolazione lavorativa degli stabilimenti italiani di FCA.

Il Politecnico di Torino ha affiancato FCA dall'inizio del progetto e per tutta la durata di esso per la definizione della procedura di misurazione, che ha riguardato diversi aspetti come: il campionamento, la scelta delle misure antropometriche da rilevare, la scelta della strumentazione, la sequenza dei rilievi antropometrici, le modalità di acquisizione e gestione dei dati antropometrici; nonché la verifica ed il controllo dei dati antropometrici, le analisi statistiche e di avanzamento dati.

Le misurazioni sono state effettuate solo su soggetti volontari che hanno espresso il loro consenso alla misurazione ed al trattamento dei loro dati per fini statistici. A questo proposito, è stato di notevole importanza il coinvolgimento dell'INAIL nel progetto e nelle campagne di sensibilizzazione svolte all'interno degli stabilimenti per motivare le finalità del progetto ed incentivare gli operai alla misurazione antropometrica.

Le misurazioni sono state effettuate in 12 sale mediche di stabilimenti produttivi italiani di FCA, situati in diverse regioni italiane: Piemonte, Emilia-Romagna, Abruzzo, Lazio, Molise, Campania e Basilicata. Di ogni soggetto sottoposto alla misurazione sono state rilevate dal personale medico 12 diverse dimensioni statiche ed il peso. Prima dell'inizio della campagna di misurazione, sono state organizzate sessioni di formazione per uniformare le misurazioni ed il processo di registrazione e salvataggio dei dati antropometrici. La raccolta antropometrica è cominciata ufficialmente ad Ottobre 2016 e la stima del completamento delle misurazioni è per Marzo 2018.

2.2 Materiali e metodi

La prima fase del progetto ha riguardato la campagna di acquisizione delle misure antropometriche. Questa fase è stata studiata in tutte le sue parti allo scopo di massimizzare l'accuratezza e l'attendibilità della banca dati antropometrica, compatibilmente con i costi, i tempi e le limitazioni imposte.

Lo studio preliminare della campagna antropometrica ha riguardato:

- Il campionamento
- La scelta delle misure antropometriche
- La strumentazione
- La procedura operativa di rilievo delle misurazioni
- La procedura per il controllo degli errori

Quando è stato possibile, si sono seguite le indicazioni fornite dalla normativa tecnica internazionale ISO 15535 (2012) che definisce i requisiti per la creazione di un database antropometrico.

2.2.1 Campionamento

Il progetto: “La Fabbrica si Misura” ha come obiettivo la generazione di un database antropometrico rappresentativo della popolazione operaia italiana. A questo proposito, l’oggetto dello studio è stato limitato solo agli operai degli stabilimenti italiani di FCA (sono stati esclusi dalle misurazioni impiegati, funzionari e dirigenti). In accordo con la normativa tecnica internazionale, i soggetti che hanno formato il campione sono stati scelti in maniera totalmente casuale. Al personale convocato in sala medica, per effettuare le visite mediche periodiche, è stato esplicitamente richiesto un consenso alla misurazione e al trattamento dei dati, ma in nessun modo è stato selezionato o mirato (per non alterare la casualità del campione).

Il numero minimo N del campione di soggetti casualmente scelti, necessario ad assicurare che il 5° ed il 95° percentile calcolato dal database stimano il vero 5° e 95° percentile della popolazione con una confidenza del 95% ed una percentuale relative di accuratezza a , è stato così calcolato (ISO 15535:2012):

$$N = \left(\frac{1,96 \times CV}{a} \right)^2 \times 1,534^2$$

Dove:

- $1,96$ è il valore (z value) di una distribuzione normale standard per un intervallo di confidenza del 95%
- CV è il coefficiente di variazione, rapporto tra la deviazione standard ed il valore medio della popolazione per la misura antropometrica in esame
- a è la percentuale di accuratezza relativa desiderata

Per la stima di CV sono stati usati come riferimenti i valori di media e deviazione standard delle stesse misure antropometriche della popolazione italiana presenti nella normativa ISO 7250-2. La stima del numero minimo del campione è stata definita dalla misura antropometrica con la maggiore dispersione rispetto alla media.

Per una numerosità del campione di $N= 3000$ soggetti per genere è stato possibile garantire, per ogni misura antropometrica scelta, un errore relativo sulla stima dei percentili estremi (P5 e P95) contenuto nell’ 1%. In aggiunta, il database a cui si fa riferimento nella ISO 7250-2 per la popolazione italiana è di 2000 soggetti per genere. Dunque, il campione scelto per questo progetto è più grande rispetto

all'attuale riferimento della normativa tecnica, e quindi permette una stima ancora più precisa delle misure antropometriche valutate.

Il campione da misurare (3000 soggetti per genere) è stato suddiviso in 12 diversi stabilimenti produttivi italiani di FCA. La ripartizione degli operai da misurare in ogni stabilimento è stata organizzata in maniera proporzionale alla popolosità lavorativa di ogni stabilimento per due principali motivi. Il primo è per suddividere le misurazioni sul territorio italiano in modo da poter studiare anche le influenze delle diverse aree geografiche nazionali sull'antropometria. Il secondo è per massimizzare la velocità di raccolta dati, in quanto negli stabilimenti più popolosi le visite mediche sono più frequenti, e di conseguenza maggiore il numero delle persone misurate nell'unità di tempo. Nello specifico, sono state scelte 12 sale mediche di diversi stabilimenti, sebbene alcuni fanno parte dello stesso polo industriale. Gli stabilimenti scelti si trovano in diverse regioni italiane, quali: Piemonte, Emilia-Romagna, Abruzzo, Lazio, Molise, Campania, Basilicata.

2.2.2 Misure antropometriche

A differenza delle più complete banche dati antropometriche presenti nella normativa tecnica internazionale ISO 7250, nel progetto: "La Fabbrica si Misura", la scelta delle misure rilevate per ogni soggetto è stata mirata su un numero limitato di misure antropometriche. E' da considerare che il tempo necessario alla misurazione completa di un operaio è lo stesso tempo a cui la risorsa è sottratta alla propria attività lavorativa. Questo, nella complessa dinamica di una realtà industriale come quella della produzione di linea, rappresenta un importante costo per l'azienda stessa.

La maggior parte dei punti antropometrici rilevati in questa campagna di misurazione sono riferiti ai giunti meccanici per la definizione di manichini e figure umane virtuali utilizzate a scopo ingegneristico per la progettazione. Per questo motivo, allo scopo di rilevare misure in un tempo limite prestabilito compreso tra i 10 e i 15 minuti per soggetto, la scelta delle misure antropometriche è stata mirata su un set di particolare interesse per la progettazione ergonomica delle postazioni di lavoro. La tabella 2.1 mostra le misure antropometriche scelte, il relativo riferimento in normativa (laddove presente), lo strumento necessario alla misurazione e la postura da assumere durante il rilievo.

Tabella 2.1: Misure antropometriche

Misura Antropometrica	Codice di riferimento (ISO 7250)	Strumento di misura	Postura
Peso	4.1.1	Bilancia	Eretta
Statura	4.1.2	Antropometro	Eretta
Altezza occhio	4.1.3	Antropometro	Eretta
Altezza cervicale	-	Antropometro	Eretta
Altezza spalla	4.1.4	Antropometro	Eretta
Altezza gomito	4.1.5	Antropometro	Eretta
Altezza trocantere	-	Antropometro	Eretta
Altezza nocca	-	Antropometro	Eretta
Altezza tibiale	4.1.8	Antropometro	Eretta
Profondità corpo	4.1.10	Antropometro	Eretta
Larghezza spalle (biacromiale)	4.2.8	Calibro scorrevole	Assisa
Larghezza gomito-gomito	4.2.10	Calibro scorrevole	Assisa
Larghezza fianchi	4.2.11	Calibro scorrevole	Assisa

Nell'appendice A sono mostrate nel dettaglio le indicazioni per una corretta misurazione, che quando possibili sono state prelevate direttamente dalla normativa tecnica internazionale, altrimenti sono state utilizzate le descrizioni definite in un'altra importante banca dati antropometrica riconosciuta a livello internazionale: la ANSUR. Oltre alle misure antropometriche direttamente rilevate in sala medica, ad ogni soggetto è stato sottoposto un questionario per recepire altre informazioni di carattere generale, ma che allo stesso tempo non violassero la privacy della persona misurata. Le informazioni ottenute dal questionario sottoposto sono le seguenti:

- Anno di nascita
- Genere
- Regione di provenienza
- Regione di provenienza dei genitori
- Misura della scarpa antinfortunistica (EUR)

In aggiunta, per ogni soggetto misurato sono stati automaticamente assegnati un codice identificativo (ID), la data ed il luogo dove il rilievo è stato effettuato.

2.2.3 Strumento di misura

La normativa ISO 7250-1 raccomanda l'uso di un antropometro e di un calibro scorrevole per il rilievo delle misure antropometriche scelte. Lo strumento di misura fornito ad ogni sala medica per le misurazioni è l'antropometro di Harpenden. Questo antropometro è uno strumento assemblabile, composto da:

- Un' asta graduata su cui scorre un contatore numerico per la lettura della misurazione
- 4 aste di diversa lunghezza per variare l'altezza di misura dello strumento e raggiungere una massima altezza misurabile di 2072 mm
- 2 branche dritte per la localizzazione dei punti antropometrici

Questo antropometro è stato scelto per l'elevata accuratezza (precisione di misurazione del millimetro), ma anche per la possibilità di montaggio/smontaggio e di conseguenza per la facilità di trasporto ed utilizzo (figura 2.1). Inoltre, sull'asta graduata è possibile montare entrambe le branche di misurazione così da poterlo utilizzare come calibro scorrevole.

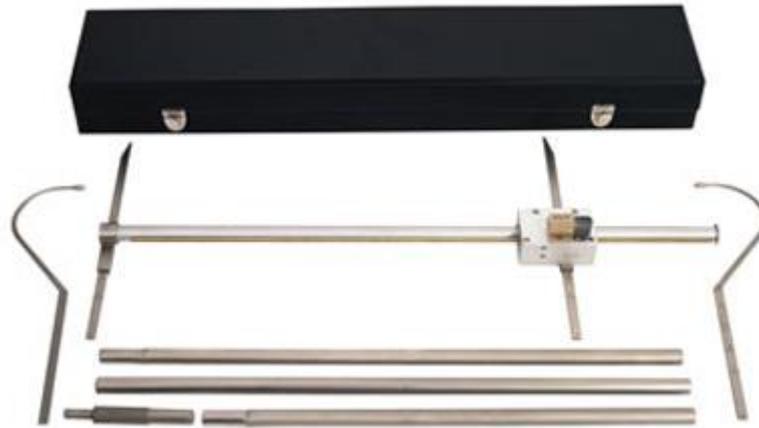


Figura 2.1: Componenti assemblabili dell'antropometro di Harpenden

2.2.4 Procedura operativa di rilievo misure

Il processo di acquisizione delle misure antropometriche del personale FCA è stato definito in modo da rendere le misurazioni univoche e coerenti con quanto specificato dalle normative internazionali e tra le diverse sale mediche dei diversi stabilimenti.

Prima dell'inizio della campagna antropometrica, i medici ed il personale addetto alle misurazioni è stato formato sull'utilizzo corretto della strumentazione e della precisa ricerca dei punti antropometrici di riferimento. Inoltre, sono state specificate le condizioni di misurazione riportate nella normativa riguardanti l'abbigliamento del soggetto e le superfici di supporto durante i rilievi (ISO 7250-1). Per il primo, è richiesto un abbigliamento minimo che non alteri la misurazione e la ricerca del punto antropometrico di riferimento, e si raccomanda di rilevare le misure con il capo scoperto ed i pini nudi. Per il secondo, si raccomanda di utilizzare superfici di stazionamento, piattaforme o superfici di seduta piane, orizzontali e non comprimibili.

Allo scopo di ottimizzare la procedura dei rilievi antropometrici, è stata definita la successione delle misurazioni da effettuare: dapprima sono state misurate le altezze rispetto al suolo, dalla maggiore (statura) alla minore (altezza tibiale). Con l'antropometro completamente assemblato (con tutte le aste montate), cominciando dalla statura, le altezze dal suolo dei diversi punti antropometrici sono state annotate, smontando le aste per diminuire l'altezza dell'antropometro a seconda della misura antropometrica da rilevare. Dopo aver annotato le altezze rispetto al

suolo, l'antropometro è utilizzato come calibro scorrevole aggiungendo l'altra branca dritta sull'asta graduata. In questo modo, sono state acquisite anche le grandezze antropometriche di larghezza e profondità del corpo.

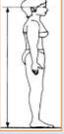
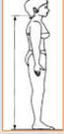
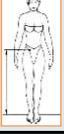
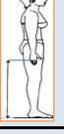
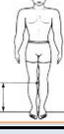
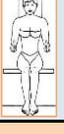
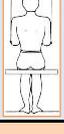
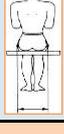
		MODULO RILIEVO DATI ANTROPOMETRICI	
Identificativo:	<input type="text"/>		
Stabilimento:	<input type="text"/>		
Data rilievo:	<input type="text"/>		
Anno di nascita:	<input type="text"/>	Sesso del soggetto:	<input type="text"/>
Regione di provenienza del soggetto:	<input type="text"/>		
Regione di provenienza dei genitori:	<input type="text"/>		
MISURE RILEVATE (in mm)			
Statura:	<input type="text"/>	Altezza occhio:	<input type="text"/>
			
		Altezza cervicale:	<input type="text"/>
			
Altezza spalla:	<input type="text"/>	Altezza gomito:	<input type="text"/>
			
		Altezza trocantere:	<input type="text"/>
			
Altezza nocca:	<input type="text"/>	Altezza tibiale:	<input type="text"/>
			
		Profondità corpo:	<input type="text"/>
			
Largh. spalle:	<input type="text"/>	Largh. gomito-gomito:	<input type="text"/>
			
		Largh. fianchi:	<input type="text"/>
			
Misura piede:	<input type="text"/>	Peso:	<input type="text"/> (Kg)

Figura 2.2: Foglio digitale di rilievo misure antropometriche

Successivamente, le misure rilevate sono state definitivamente registrate dal personale addetto di sala medica, attraverso una postazione computer e un foglio di

lavoro digitale predisposto per questo uso. La figura 2.2 mostra il foglio digitale usato per il caricamento delle schede antropometriche di ogni soggetto misurato. Per ridurre l'inserimento di dati errati durante il caricamento del foglio digitale, le misure da rilevare sono state disposte nello stesso ordine in cui è stato definito l'ordine di misurazione. Inoltre, ad ogni misura antropometrica è stata associata un'immagine esplicativa della misurazione stessa.

2.2.5 Procedura per il controllo degli errori

Ogni singola scheda antropometrica è stata registrata dalla postazione dedicata nelle sale mediche di ogni stabilimento. In seguito, le schede sono automaticamente caricate su un foglio di riepilogo che serve come database di tutte le misurazioni effettuate. I dati raccolti nel database sono stati analizzati con cadenza settimanale per evidenziare potenziali errori durante le misurazioni. Infatti, sia la misurazione stessa, che l'operazione di registrazione della scheda può essere soggetta ad errori. A questo scopo, è stato predisposto un controllo delle grandezze antropometriche per evidenziare tali errori. Il controllo avviene per le misure antropometriche: Statura, Altezza occhio, Altezza cervicale, Altezza spalla, Altezza gomito, Altezza trocantere, Altezza nocca e Altezza tibiale, che presentano una correlazione significativa. Infatti, ogni soggetto tende a mantenere una certa proporzionalità tra le diverse misure corporee, e per questo motivo, sono stati calcolati i rapporti tra le misure corporee rispetto alla statura:

$$X_{i\%} = \frac{X_i}{Statura}$$

Poi, sono stati ottenuti dei valori di rapporti tra le misure prendendo come riferimento le costanti proporzionali di Drillis e Contini (1966) o direttamente dal rapporto dei valori medi dei valori di normativa ISO 7250-2 (2009). A partire da questi valori, tramite un'indagine pilota, sono stati ottenuti i rapporti limiti superiore e inferiore (mostrati in tabella 2.2) impostando una tolleranza tale da escludere il 5% dei soggetti misurati su un campione iniziale delle misurazioni.

Per ogni soggetto, i rapporti così calcolati, sono stati confrontati con i coefficienti di proporzionalità mostrati in tabella 2.2. Quando in un soggetto, il rapporto di una certa misura antropometrica rispetto alla statura ($X_{i\%}$) è risultato un valore esterno all'intervallo compreso tra il limite inferiore e il limite superiore dei valori di riferimento in tabella 2.2, il sistema di controllo evidenziava la scheda come "da verificare".

Tabella 2.2: Valori di confronto per i rapporti delle misure antropometriche rispetto la statura.

Rapporto limite inferiore	X_i	Rapporto limite superiore
0,9	Altezza occhio	0,96
0,82	Altezza cervicale	0,9
0,79	Altezza spalla	0,87
0,56	Altezza gomito	0,7
0,46	Altezza trocantere	0,59
0,38	Altezza nocca	0,5
0,19	Altezza tibiale	0,35

Le schede segnalate con almeno una misura antropometrica “fuori range” sono state comunicate alle sale mediche dei singoli stabilimenti che hanno effettuato una verifica delle misurazioni, misurando nuovamente il soggetto, quando possibile. In seguito alla verifica dello stabilimento, la scheda antropometrica segnalata è stata confermata, corretta o eliminata dall’archivio generale.

2.3 Analisi statistiche e risultati

Oltre al controllo degli errori, durante il periodo di acquisizione delle misure antropometriche (§2.2.5) è stato effettuato un ulteriore controllo del database alla fine della raccolta dati e prima di analizzarlo statisticamente.

Come suggerito dalla normativa ISO 15535:2012, per ogni misura antropometrica sono stati definiti dei valori di soglia come: $\pm 3\sigma$. Ogni misura antropometrica è stata confrontata con tali valori ed eliminata dal database quando fuori dall’intervallo così definito.

Dopo aver ripulito il database da misure potenzialmente errate, il campione è stato diviso per genere ed analizzato statisticamente. I prossimi paragrafi presentano un riepilogo dei dati raccolti ed i risultati delle analisi statistiche.

2.3.1 Database maschile

Il campione maschile, dei dati raccolti da Ottobre 2016 a Settembre 2017, comprende 3174 uomini di età compresa tra i 18 e i 65 anni, di cui, l'età media e la deviazione standard sono di 43.13 ± 9.98 anni. La tabella 2.3 mostra la distribuzione dell'età del campione in 5 fasce di età (18-25, 26-35, 36-45, 46-55, 56-65), così scelte per uniformare e confrontare i dati del campione con gli strumenti utilizzati in FCA per la gestione delle anagrafiche degli operai.

Tabella 2.3: Distribuzione del campione maschile per fasce di età

Fasce di età (anni)	Maschi	
	N	%
18-25	226	7,1%
26-35	465	14,7%
36-45	1054	33,2%
46-55	1137	35,8%
56-65	292	9,2%

Il campionamento è stato effettuato in maniera casuale. E' evidente dalla tabella che la popolazione lavorativa operaia attuale non si distribuisce uniformemente per le fasce di età. Nello specifico, la fascia di età 36-55 anni comprende il 69% dell'intero campione misurato.

Tabella 2.4: Analisi statistica del campione maschili (i valori di tutte le misure antropometriche sono espressi in mm, tranne il Peso in kg).

Misura antropometrica	Media	Deviazione standard	P1	P5	P95	P99
Peso	81	13	56	63	104	120
Statura	1726	71	1552	1609	1840	1895
Altezza Occhio	1617	70	1448	1500	1727	1785
Altezza cervicale	1496	68	1333	1381	1604	1652
Altezza spalla	1431	67	1274	1321	1540	1595
Altezza gomito	1064	60	933	970	1164	1213
Altezza trocantere	905	61	772	810	1004	1050
Altezza nocca	747	46	640	672	826	855
Altezza tibiale	451	54	332	365	548	589
Profondità corpo	259	45	155	186	336	367
Larghezza spalle (biacromiale)	392	44	291	320	462	493
Larghezza gomito-gomito	474	51	347	388	559	573
Larghezza fianchi	350	42	252	280	416	444

In tabella 2.4 sono mostrati i valori statistici di media e deviazione standard di tutte le misure antropometriche che sono state raccolte. Inoltre, sono mostrati i valori di alcuni percentili antropometrici particolarmente utilizzati per la progettazione delle postazioni di lavoro (1°, 5°, 95°, 99°).

Tabella 2.5: Matrice di correlazione tra le misure antropometriche

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Statura (1)	1,00												
Altezza occhio (2)	0,98	1,00											
Altezza cervicale (3)	0,95	0,94	1,00										
Altezza spalla (4)	0,94	0,94	0,94	1,00									
Altezza gomito (5)	0,84	0,84	0,84	0,86	1,00								
Altezza trocantere (6)	0,66	0,66	0,66	0,71	0,66	1,00							
Altezza nocca (7)	0,76	0,76	0,76	0,81	0,84	0,62	1,00						
Altezza tibiale (8)	0,51	0,52	0,53	0,61	0,55	0,57	0,59	1,00					
Profondità corpo (9)	0,01	0,02	0,04	0,10	0,02	0,06	0,07	0,18	1,00				
Larghezza spalle (10)	0,19	0,18	0,20	0,14	0,18	0,15	0,14	0,04	0,02	1,00			
Larghezza gomito-gomito (11)	0,16	0,17	0,18	0,22	0,19	0,12	0,22	0,17	0,44	0,21	1,00		
Larghezza fianchi (12)	0,17	0,18	0,20	0,26	0,12	0,13	0,20	0,26	0,57	0,05	0,46	1,00	
Peso (13)	0,43	0,43	0,43	0,45	0,43	0,27	0,39	0,21	0,42	0,34	0,65	0,45	1,00

La tabella 2.5 rappresenta la matrice di correlazione tra le misure antropometriche. Per ogni coppia di misure è calcolato il coefficiente di Pearson ρ che permette di quantificare la correlazione tra le due variabili. Il coefficiente di correlazione ρ tra due variabili (X e Y) è definito come:

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

Dove:

- σ_{XY} è la covarianza tra le variabili X e Y
- σ_X e σ_Y sono le deviazioni standard delle variabili X e Y

La maggiore correlazione è stata calcolata tra le misure verticali (altezze). Il valore massimo di correlazione è 0.98 tra statura e altezza occhio, ma comunque considerando le altezze dal gomito in su, la correlazione è almeno di 0.83, mentre includendo tutte le altezze la correlazione è comunque superiore a 0.50. Al contrario, le misurazioni delle altezze sono molto poco correlate con le larghezze e le profondità del corpo.

Per completare l'analisi statistica descrittiva delle variabili misurate sono stati elaborati gli istogrammi di frequenza delle misure antropometriche. Per ogni misura antropometrica, l'intervallo di variabilità della misurazione è stato suddiviso in 20 classi di uguale dimensione. Di seguito saranno mostrati gli istogrammi di tutte le misure, dove sulle ascisse sono rappresentate le 20 classi di ciascuna misura antropometrica, e sulle ordinate è rappresentata la frequenza di ogni classe:

- Per la statura è stato rilevato un valore minimo di 1412 mm ed un massimo di 2026 mm. L'intervallo di variabilità di 614 mm è stato suddiviso in 20 classi di 31 mm:

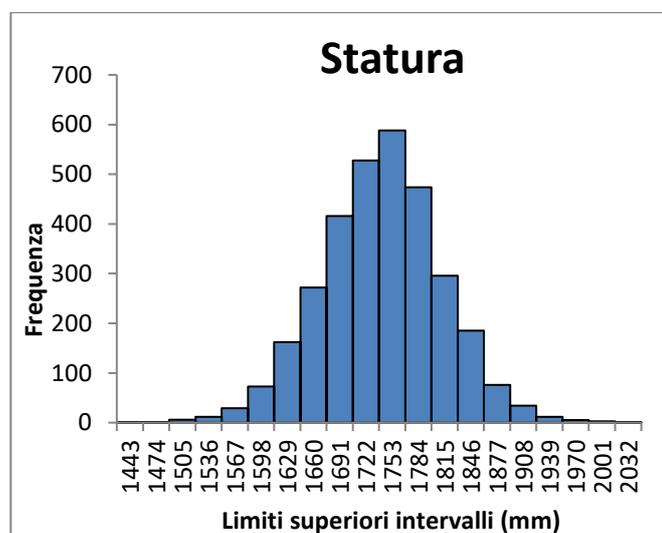


Figura 2.3: Istogramma di distribuzione della statura del campione maschile

- Per l'altezza occhio è stato rilevato un valore minimo di 1312 mm ed un massimo di 1891 mm. L'intervallo di variabilità di 579 mm è stato suddiviso in 20 classi di 29 mm:

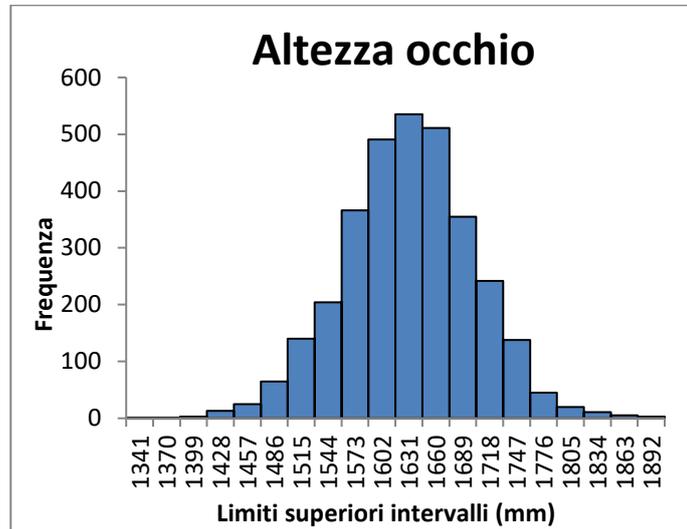


Figura 2.4: Istogramma di distribuzione dell'altezza occhio del campione maschile

- Per l'altezza cervicale è stato rilevato un valore minimo di 1201 mm ed un massimo di 1807 mm. L'intervallo di variabilità di 606 mm è stato suddiviso in 20 classi di 31 mm:

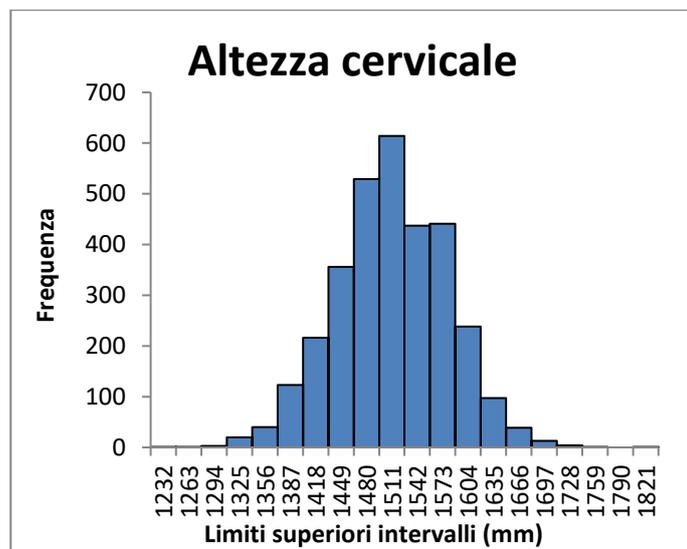


Figura 2.5: Istogramma di distribuzione dell'altezza cervicale del campione maschile

- Per l'altezza spalla è stato rilevato un valore minimo di 1138 mm ed un massimo di 1732 mm. L'intervallo di variabilità di 594 mm è stato suddiviso in 20 classi di 30 mm:

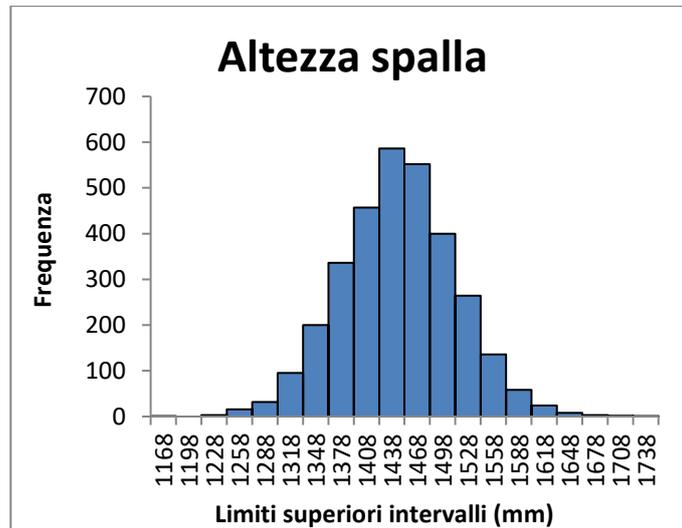


Figura 2.6: Istogramma di distribuzione dell'altezza spalla del campione maschile

- Per l'altezza gomito è stato rilevato un valore minimo di 818 mm ed un massimo di 1309 mm. L'intervallo di variabilità di 491 mm è stato suddiviso in 20 classi di 25 mm:

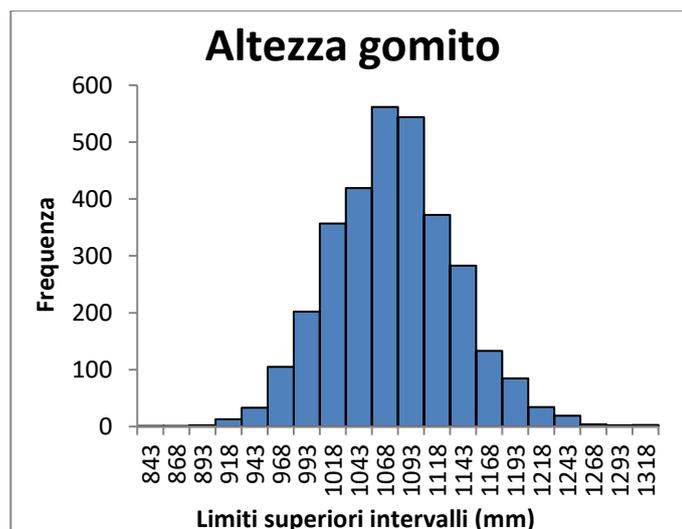


Figura 2.7: Istogramma di distribuzione dell'altezza gomito del campione maschile

- Per l'altezza trocantere è stato rilevato un valore minimo di 707 mm ed un massimo di 1106 mm. L'intervallo di variabilità di 399 mm è stato suddiviso in 20 classi di 20 mm:

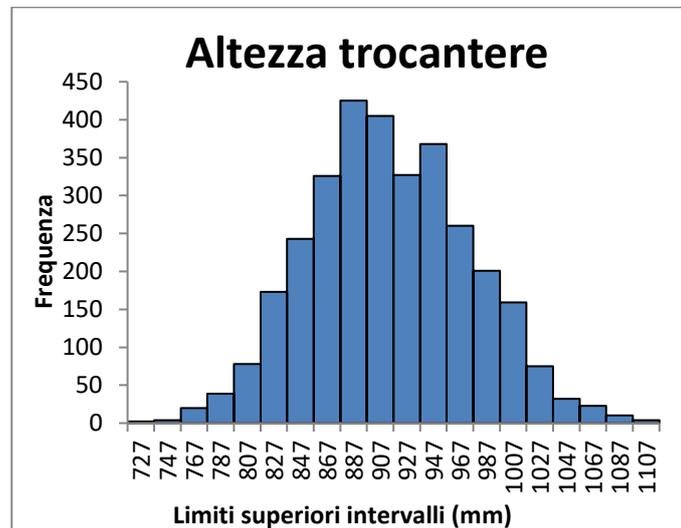


Figura 2.8: Istogramma di distribuzione dell'altezza trocantere del campione maschile

- Per l'altezza nocca è stato rilevato un valore minimo di 594 mm ed un massimo di 940 mm. L'intervallo di variabilità di 346 mm è stato suddiviso in 20 classi di 18 mm:

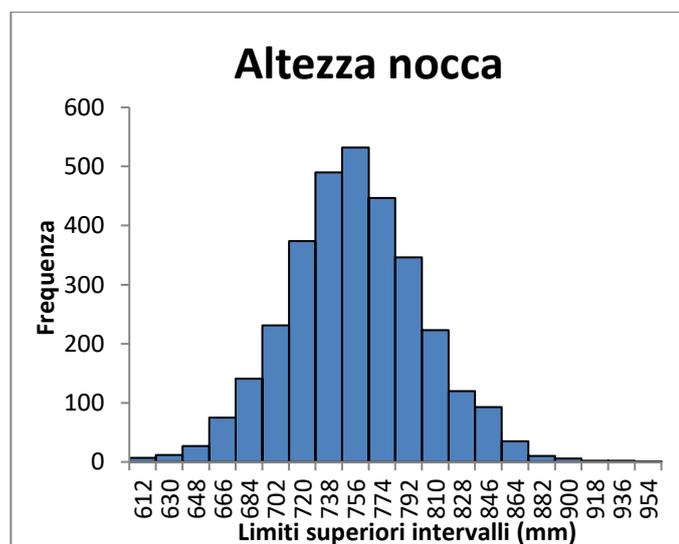


Figura 2.9: Istogramma di distribuzione dell'altezza nocca del campione maschile

- Per l'altezza tibiale è stato rilevato un valore minimo di 297 mm ed un massimo di 634 mm. L'intervallo di variabilità di 337 mm è stato suddiviso in 20 classi di 17 mm:

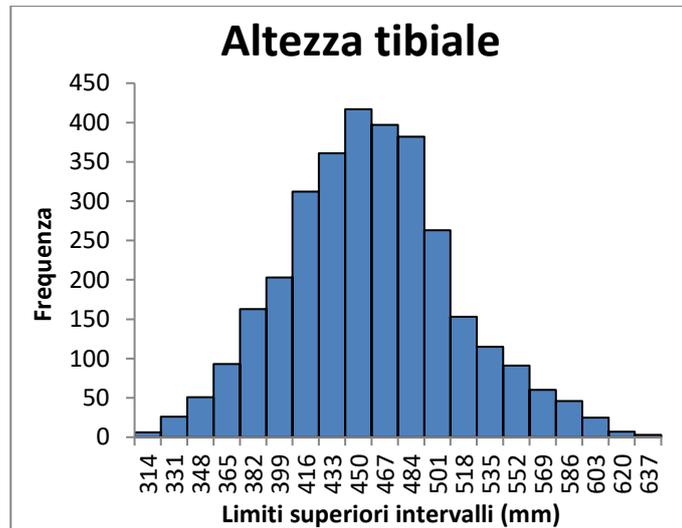


Figura 2.10: Istogramma di distribuzione dell'altezza tibiale del campione maschile

- Per la profondità corpo è stato rilevato un valore minimo di 126 mm ed un massimo di 392 mm. L'intervallo di variabilità di 266 mm è stato suddiviso in 20 classi di 14 mm:

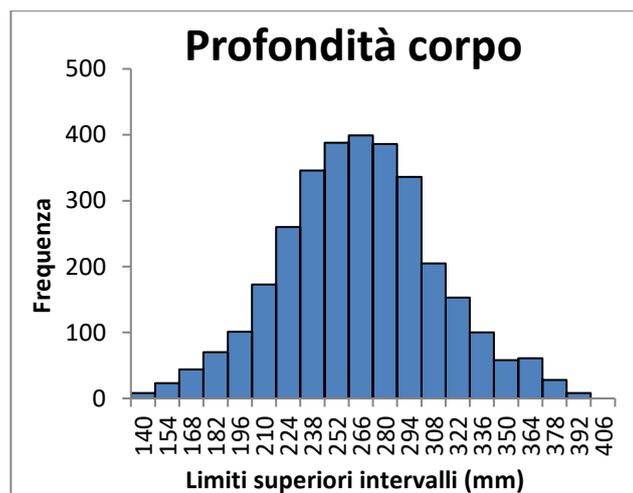


Figura 2.11: Istogramma di distribuzione della profondità del corpo del campione maschile

- Per la larghezza spalle è stato rilevato un valore minimo di 261 mm ed un massimo di 523 mm. L'intervallo di variabilità di 262 mm è stato suddiviso in 20 classi di 14 mm:

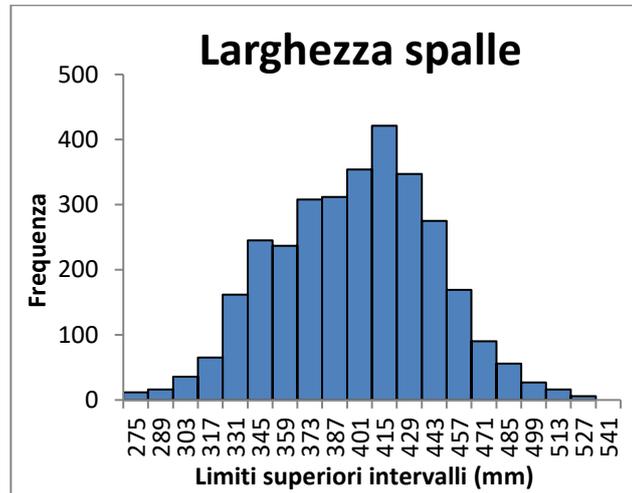


Figura 2.12: Istogramma di distribuzione della larghezza spalle del campione maschile

- Per la larghezza gomito-gomito è stato rilevato un valore minimo di 321 mm ed un massimo di 623 mm. L'intervallo di variabilità di 302 mm è stato suddiviso in 20 classi di 16 mm:

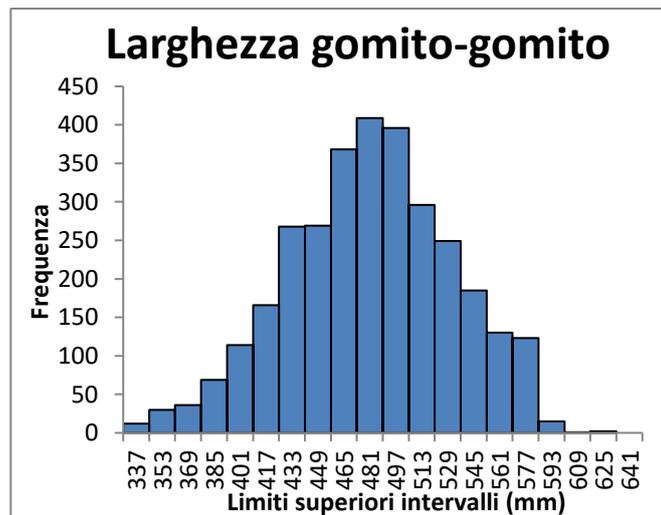


Figura 2.13: Istogramma di distribuzione della larghezza gomito-gomito del campione maschile

- Per la larghezza fianchi è stato rilevato un valore minimo di 225 mm ed un massimo di 472 mm. L'intervallo di variabilità di 247 mm è stato suddiviso in 20 classi di 13 mm:

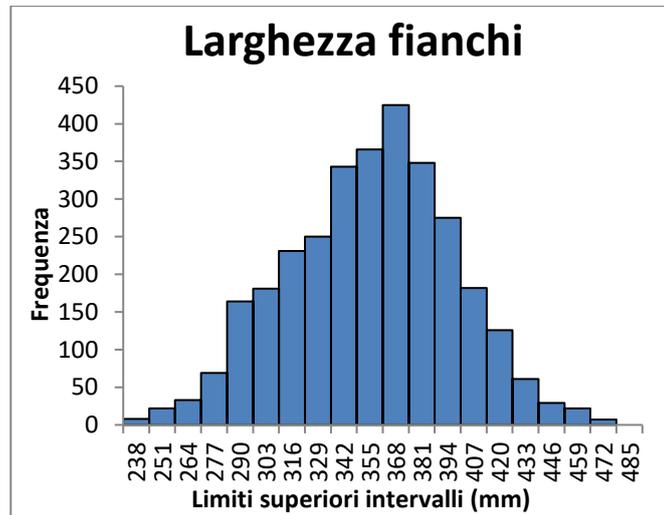


Figura 2.14: Istogramma di distribuzione della larghezza fianchi del campione maschile

- Per il peso è stato rilevato un valore minimo di 47 kg ed un massimo di 144 kg. L'intervallo di variabilità di 97 kg è stato suddiviso in 20 classi di 5 kg:

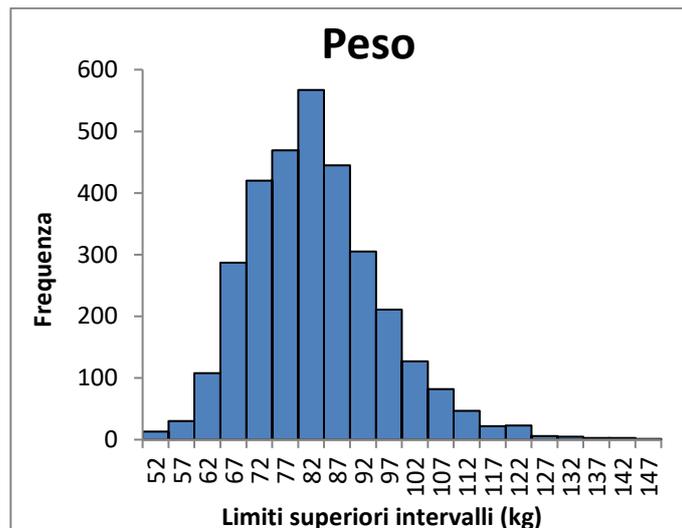


Figura 2.15: Istogramma di distribuzione del peso del campione maschile

2.3.2 Database femminile

Il campione femminile non è completo e le misurazioni sono in corso per raggiungere almeno 3000 soggetti. Il database raccolto da Ottobre 2016 a Settembre 2017 include 2112 donne di età compresa tra 18 e 65 anni di cui, l'età media e la deviazione standard sono di 43.68 ± 9.46 anni. La tabella 2.6 mostra la distribuzione di età del campione.

Tabella 2.6: Distribuzione del campione femminile per fasce di età

Fasce di età (anni)	Femmine	
	N	%
18-25	96	4,5%
26-35	309	14,6%
36-45	799	37,8%
46-55	660	31,3%
56-65	247	11,7%

Nonostante il campionamento casuale, la distribuzione per fasce di età del campione femminile è abbastanza simile al campione maschile. La differenza percentuale tra le medesime fasce di età dei due generi non supera il 3-4%.

Come per il database maschile, la tabella 2.7 mostra la media, deviazione standard e alcuni percentili.

Tabella 2.7: Analisi statistica del campione femminile (i valori di tutte le misure antropometriche sono espressi in mm, tranne il Peso in kg).

Misura antropometrica	Media	Deviazione standard	P1	P5	P95	P99
Peso	65	13	44	49	90	103
Statura	1595	65	1443	1492	1702	1751
Altezza Occhio	1493	62	1358	1394	1595	1640
Altezza cervicale	1376	61	1236	1276	1475	1529
Altezza spalla	1319	61	1182	1220	1417	1467
Altezza gomito	987	55	869	902	1083	1124
Altezza trocantere	854	57	729	762	948	983
Altezza nocca	702	45	600	632	777	811
Altezza tibiale	419	49	307	335	502	538
Profondità corpo	254	43	162	189	331	357
Larghezza spalle (biacromiale)	347	36	269	287	406	426
Larghezza gomito-gomito	412	55	293	324	508	549
Larghezza fianchi	343	58	217	240	432	467

Anche per il database femminile è stata ottenuta la matrice di correlazione tra le misure antropometriche (tabella 2.8)

Tabella 2.8: Matrice di correlazione tra le misure antropometriche

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Statura	1,00												
Altezza occhio	0,98	1,00											
Altezza cervicale	0,94	0,94	1,00										
Altezza spalla	0,94	0,94	0,95	1,00									
Altezza gomito	0,84	0,84	0,84	0,87	1,00								
Altezza trocantere	0,68	0,68	0,68	0,71	0,70	1,00							
Altezza nocca	0,79	0,78	0,79	0,84	0,85	0,62	1,00						
Altezza tibiale	0,57	0,59	0,61	0,67	0,63	0,60	0,64	1,00					
Profondità corpo	0,02	0,04	0,04	0,07	0,01	0,06	0,09	0,13	1,00				
Larghezza spalle	0,11	0,12	0,14	0,09	0,08	0,16	0,07	0,05	0,24	1,00			
Larghezza gomito-gomito	0,02	0,04	0,04	0,08	0,06	0,05	0,08	0,12	0,63	0,25	1,00		
Larghezza fianchi	0,01	0,03	0,03	0,04	0,03	0,01	0,01	0,06	0,48	0,04	0,52	1,00	
Peso	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23	0,19	0,22	0,15	0,58	0,38	0,72	0,46	1,00

I valori del coefficiente di correlazione di Pearson ρ , che generano la matrice di correlazione, variano poco sensibilmente tra i database maschili e femminili. Soprattutto le misure antropometriche più correlate tra loro (come ad esempio tra le misure di altezza) non evidenziano particolari differenze dovute al genere. Le differenze più significative tra le matrici di correlazione calcolate dai database maschile e femminile si notano per le misure meno correlate (come ad esempio tra le misure di altezza e di larghezza).

Infine, seguiranno gli istogrammi di frequenze per le misure antropometriche rilevate per le donne:

- Per la statura è stato rilevato un valore minimo di 1340 mm ed un massimo di 1820 mm. L'intervallo di variabilità di 480 mm è stato suddiviso in 20 classi di 24 mm:

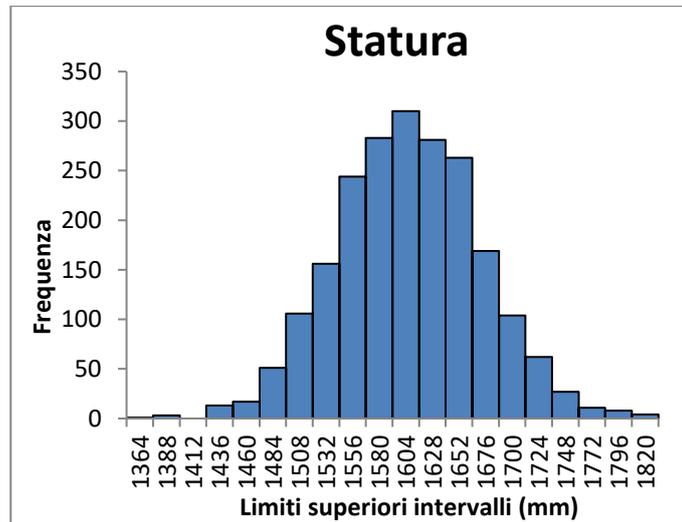


Figura 2.16: Istogramma di distribuzione della statura del campione femminile

- Per l'altezza occhio è stato rilevato un valore minimo di 1272 mm ed un massimo di 1715 mm. L'intervallo di variabilità di 443 mm è stato suddiviso in 20 classi di 23 mm:

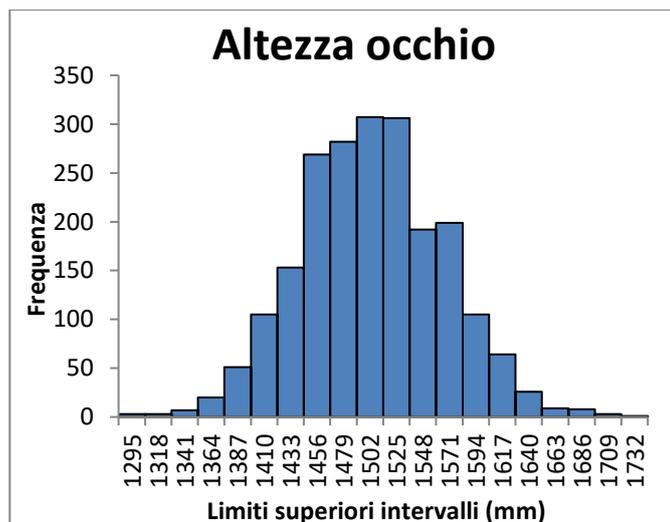


Figura 2.17: Istogramma di distribuzione dell'altezza occhio del campione femminile

- Per l'altezza cervicale è stato rilevato un valore minimo di 1171 mm ed un massimo di 1591 mm. L'intervallo di variabilità di 420 mm è stato suddiviso in 20 classi di 21 mm:

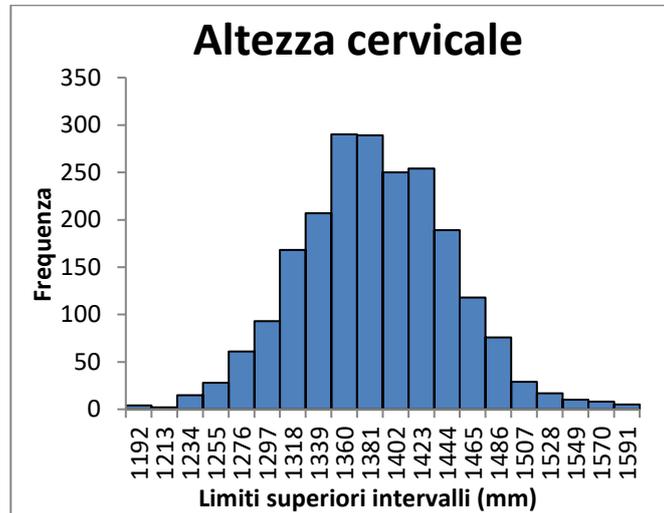


Figura 2.18: Istogramma di distribuzione dell'altezza cervicale del campione femminile

- Per l'altezza spalla è stato rilevato un valore minimo di 1104 mm ed un massimo di 1534 mm. L'intervallo di variabilità di 430 mm è stato suddiviso in 20 classi di 22 mm:

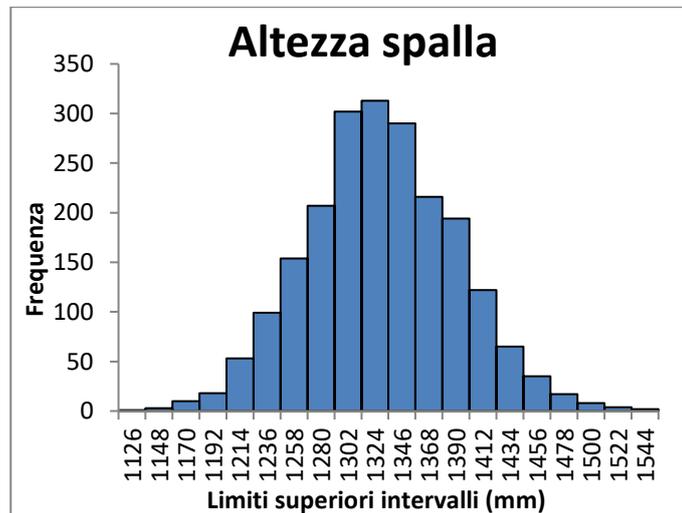


Figura 2.19: Istogramma di distribuzione dell'altezza spalla del campione femminile

- Per l'altezza gomito è stato rilevato un valore minimo di 827 mm ed un massimo di 1190 mm. L'intervallo di variabilità di 363 mm è stato suddiviso in 20 classi di 19 mm:

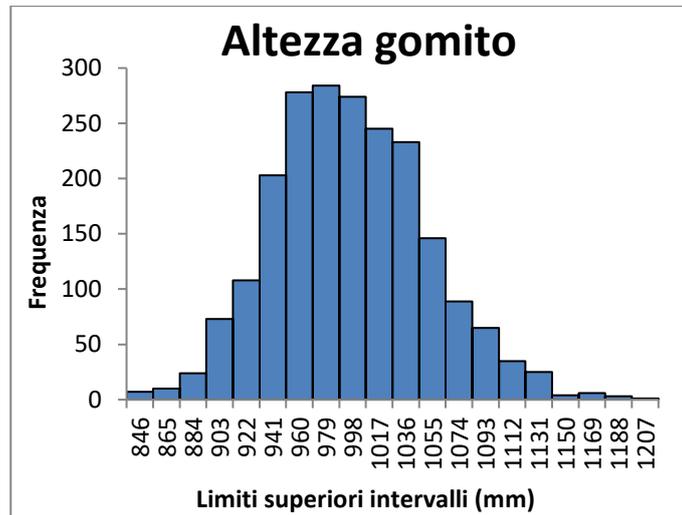


Figura 2.20: Istogramma di distribuzione dell'altezza gomito del campione femminile

- Per l'altezza trocantere è stato rilevato un valore minimo di 658 mm ed un massimo di 1047 mm. L'intervallo di variabilità di 389 mm è stato suddiviso in 20 classi di 20 mm:

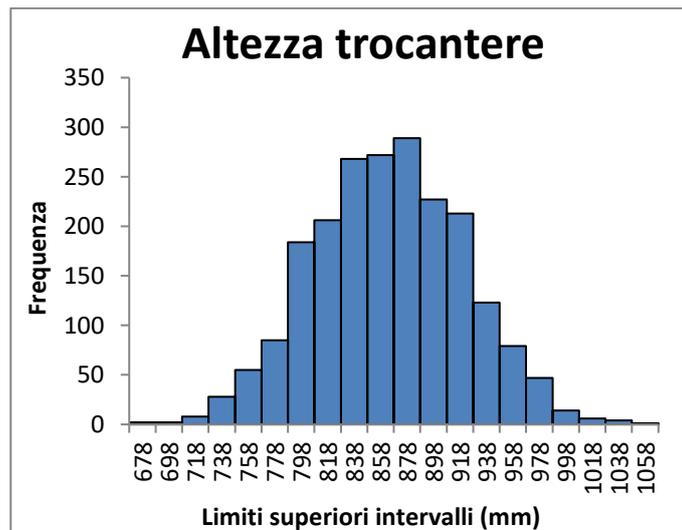


Figura 2.21: Istogramma di distribuzione dell'altezza trocantere del campione femminile

- Per l'altezza nocca è stato rilevato un valore minimo di 522 mm ed un massimo di 874 mm. L'intervallo di variabilità di 352 mm è stato suddiviso in 20 classi di 18 mm:

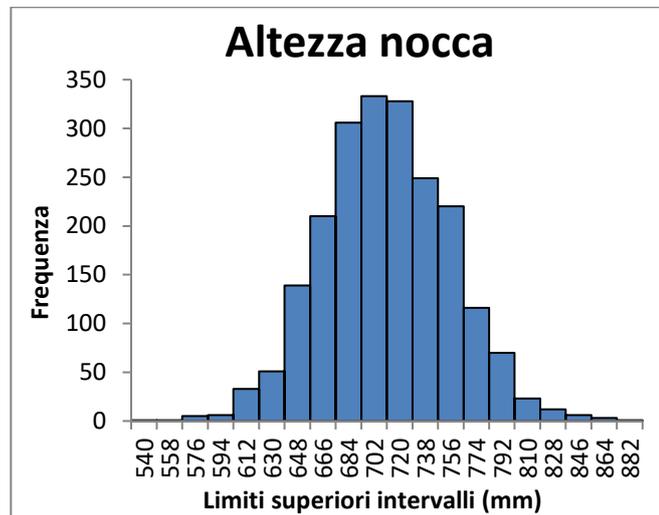


Figura 2.22: Istogramma di distribuzione dell'altezza nocca del campione femminile

- Per l'altezza tibiale è stato rilevato un valore minimo di 280 mm ed un massimo di 624 mm. L'intervallo di variabilità di 344 mm è stato suddiviso in 20 classi di 18 mm:

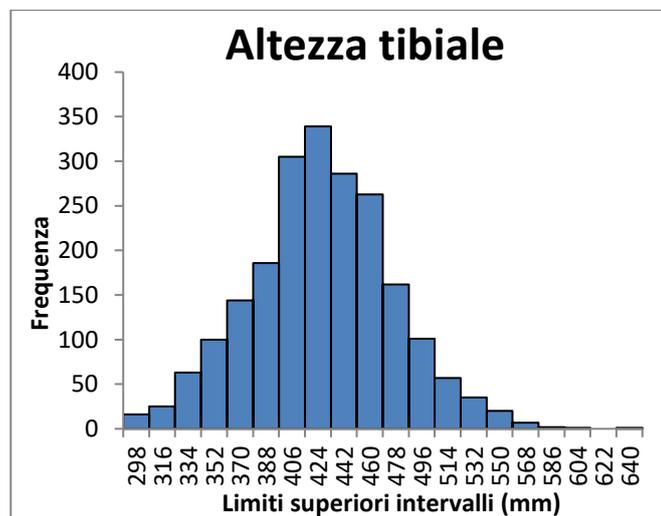


Figura 2.23: Istogramma di distribuzione dell'altezza tibiale del campione femminile

- Per la profondità corpo è stato rilevato un valore minimo di 128 mm ed un massimo di 379 mm. L'intervallo di variabilità di 251 mm è stato suddiviso in 20 classi di 13 mm:

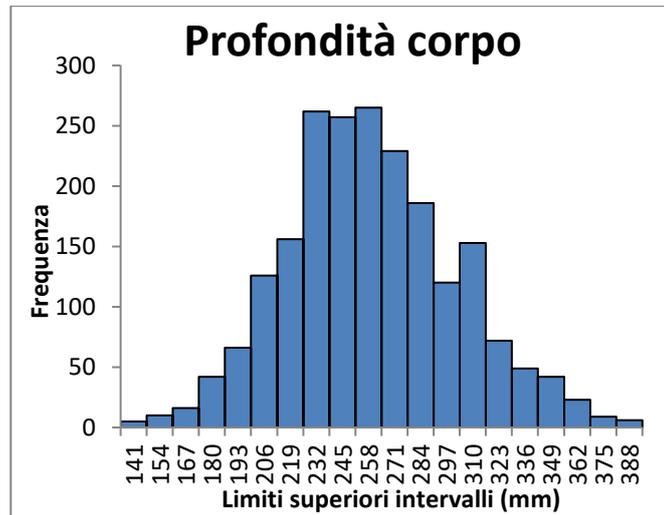


Figura 2.24: Istogramma di distribuzione della profondità del corpo del campione femminile

- Per la larghezza spalle è stato rilevato un valore minimo di 239 mm ed un massimo di 450 mm. L'intervallo di variabilità di 211 mm è stato suddiviso in 20 classi di 11 mm:

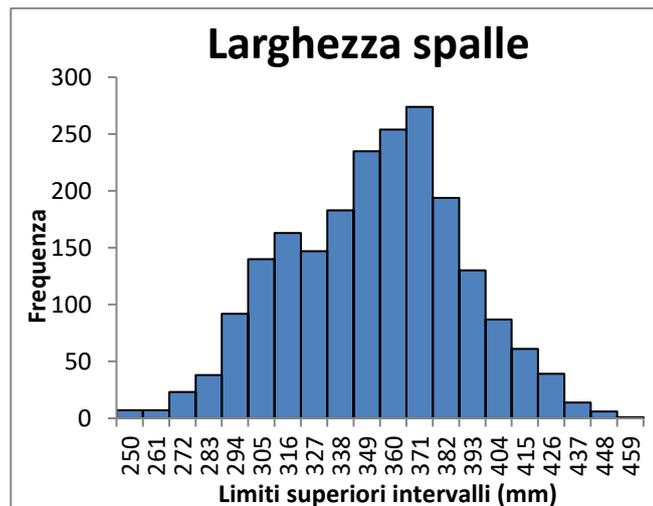


Figura 2.25: Istogramma di distribuzione della larghezza spalle del campione femminile

- Per la larghezza gomito-gomito è stato rilevato un valore minimo di 254 mm ed un massimo di 575 mm. L'intervallo di variabilità di 321 mm è stato suddiviso in 20 classi di 17 mm:

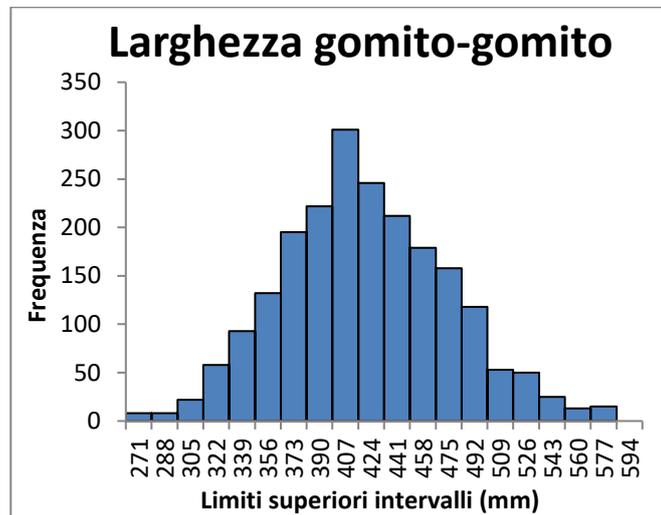


Figura 2.26: Istogramma di distribuzione della larghezza gomito-gomito del campione femminile

- Per la larghezza fianchi è stato rilevato un valore minimo di 175 mm ed un massimo di 512 mm. L'intervallo di variabilità di 337 mm è stato suddiviso in 20 classi di 17 mm:

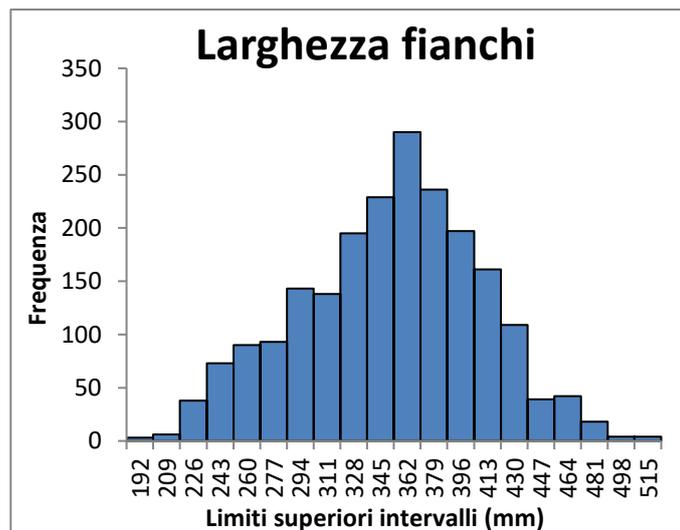


Figura 2.27: Istogramma di distribuzione della larghezza fianchi del campione femminile

- Per il peso è stato rilevato un valore minimo di 38 kg ed un massimo di 130 kg. L'intervallo di variabilità di 92 kg è stato suddiviso in 20 classi di 5 kg:

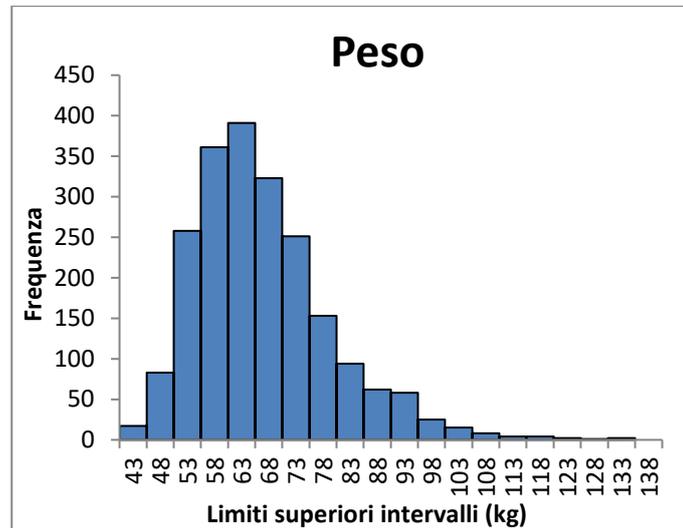


Figura 2.28: Istogramma di distribuzione del peso del campione femminile

2.4 Altri risultati e discussioni antropometriche

Tra le misure antropometriche rilevate, statura e peso sono quelle su cui si pone un particolare interesse, soprattutto perché sono le dimensioni meglio correlate alle altezze (statura) e le larghezze (peso), come si è visto dall'analisi della matrice di correlazione. Infatti, esse sono le misure antropometriche su cui molti studi hanno basato le tecniche di regressione lineare per la stima delle misure antropometriche mancanti nelle banche dati (Fromuth, R. C., & Parkinson, M. B., 2008; Nadadur, G., & Parkinson, M. B., 2008; Haupt, D. R., & Parkinson, M. B., 2014).

Un altro parametro di particolare interesse, per studi ingegneristici e non, è l'indice di massa corporea (in inglese "Body mass index" BMI). Il BMI è un dato biometrico definito dal matematico e statistico Adolphe Quetelet, come rapporto tra peso e quadrato dell'altezza di un individuo:

$$BMI = \frac{PESO}{STATURA^2}$$

Il BMI è stato utilizzato come un indicatore dello stato di peso-forma per la prima volta nel 1967 su studi di obesità (Khosla, T., & Lowe, C. R., 1967). Dunque,

per statura e BMI è stata fatta un'analisi più approfondita, dove i valori medi sono stati calcolati dividendo il campione per aree geografiche e fasce di età. Per valutare la significatività delle differenze tra le aree geografiche (3 gruppi Nord/Centro/Sud) sono stati eseguiti, per ogni coppia, t-test a due code ($\alpha = 0.05$), mentre per valutare le differenze tra fasce di età (5 gruppi) sono stati effettuati test della varianza ANOVA ad un fattore ($\alpha = 0.05$).

2.4.1 Statura

Nella tabella 2.9 sono riportati i valori di media e deviazione standard della statura differenziando il campione per genere e area geografica.

Nello specifico, sono stati considerati nell'area geografia del nord-Italia le misurazioni rilevate negli stabilimenti in Piemonte, mentre appartengono alla zona del centro-Italia gli stabilimenti in Emilia-Romagna, Abruzzo, Lazio, Molise; infine gli stabilimenti in Campania e Basilicata sono stati considerati rappresentativi del sud-Italia. La tabella 2.9 evidenzia differenze significative (Nord/Centro, Centro/Sud, Nord/Sud, $p < 0.001$) tra le stature medie rilevate nelle tre aree geografiche, ma dal momento che l'età influenza la statura, nella tabella è stata anche inserita l'età media del campione misurato.

Tabella 2.9: Dati statistici di statura ed età del campione diviso per genere ed area geografica

Genere e area geografica	N	Statura (mm)		Età (anni)	
		Media	Deviazione standard	Media	Deviazione standard
Maschi Nord	650	1701	73	49	8
Maschi Centro	1263	1737	71	42	11
Maschi Sud	1261	1727	68	41	9

Femmine Nord	718	1571	64	49	8
Femmine Centro	925	1614	61	41	9
Femmine Sud	469	1596	60	41	9

Per entrambi i generi, mediamente le persone più alte si trovano nel centro-Italia e le più basse nel Nord. La differenza di statura tra Nord e Sud Italia è parzialmente attribuibile alla differenza di 7/8 anni di età media tra i campioni misurati; tuttavia, nonostante l'età media tra i campioni Centro e Sud sia poco differente, le stature medie degli uomini differiscono di 1 cm e quelle delle donne di quasi 2 cm.

Le differenze di statura tra le tre aree geografiche italiane sottolineano l'importanza di una raccolta dei dati antropometrici distribuita in diverse regioni del suolo nazionale. Inoltre, in aggiunta ai dati statistici su tutta la popolazione italiana, si potrebbe prendere in considerazione l'idea di creare diversi modelli antropometrici per ogni area geografica, così da rappresentare con maggiore accuratezza la popolazione lavorativa della singola area geografica.

Come anticipato già in precedenza, l'antropometria varia con l'età del soggetto. Per questo motivo, sono state approfondite le analisi statistiche di ogni sottocampione corrispondente ad una diversa classe di età. Infatti, per ogni classe di età sono state calcolate media, deviazione standard e i principali percentili antropometrici.

Nella figura 2.29 sono mostrati gli andamenti di statura del P5, P50 e P95 maschile per ogni classe di età (il numero di soggetti misurati per ogni classe di età è in tabella 2.3). Le curve rappresentative dei tre percentili hanno un andamento simile, che evidenzia una crescita antropometrica fino ai 30 anni (classe 26-35 anni), mentre la statura media tende a diminuire con l'aumentare degli anni fino a raggiungere un minimo per la classe più anziana (56-65 anni). Si può notare una leggera differenza osservando il trend del P95; infatti in questo caso, la statura massima è raggiunta già nella classe di età più giovane (18-25 anni). Probabilmente

questo aspetto è attribuibile alla precocità delle persone più alte, che tendono a completare lo sviluppo fisico prima rispetto alla media.

In generale, è interessante osservare quanto la media della statura cambi con l'età. Ad esempio, per la curva del P50 si osserva una diminuzione della statura di 6 cm tra il punto di massimo raggiunto nella classe 26-35 e quello di minimo della classe più anziana. In questo caso è stato effettuato un test della varianza ANOVA a singolo fattore con un livello di significatività $\alpha = 0.05$, che ha evidenziato almeno una differenza significativa tra una coppia di classi di età ($p < 0.001$).

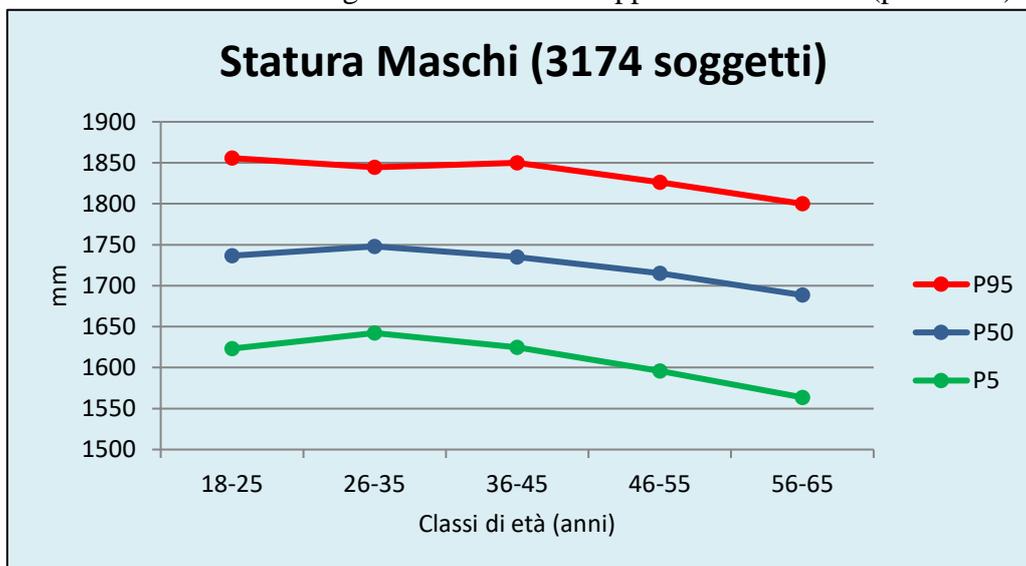


Figura 2.29: Distribuzione per classi di età dei valori del 5°, 50° e 95° percentile maschile di statura

Come per la figura precedente, nella figura 2.30 sono mostrati gli andamenti di statura del P5, P50 e P95 femminile per ogni classe di età (il numero di soggetti misurati per ogni classe di età è in tabella 2.6).

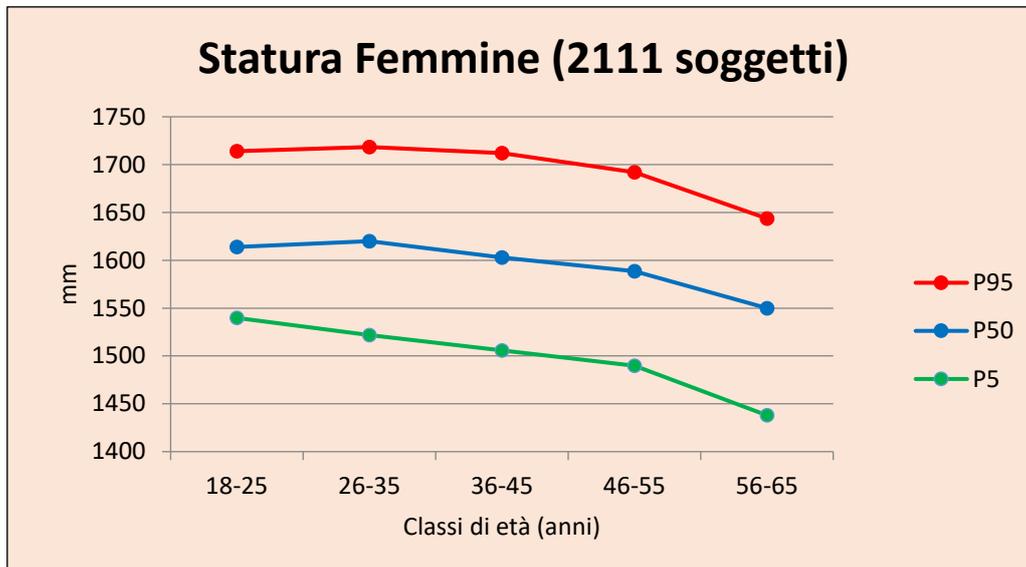


Figura 2.30: Distribuzione per classi di età dei valori del 5°, 50° e 95° percentile femminile di statura

Le curve rappresentative dei tre percentili hanno un andamento simile al database maschile, mostrando una diminuzione progressiva della statura media con l'avanzare dell'età. Nel caso del P50 femminile, la statura passa da un valore di 1620 mm nella classe 26-35 ad un minimo di 1550 mm nella classe 56-65, mostrando una diminuzione complessiva di 7 cm. Anche per il campione femminile è stato effettuato un test della varianza ANOVA a singolo fattore con un livello di significatività $\alpha = 0.05$, che ha evidenziato almeno una differenza significativa tra una coppia di classi di età ($p < 0.001$).

2.4.2 BMI

Operativamente, l'indice di massa corporea si calcola come il rapporto tra la massa-peso, espressa in chilogrammi, e il quadrato dell'altezza, espressa in metri.

Questo indice è spesso utilizzato in maniera grossolana per la stima dell'obesità o del peso-forma (Rothman, K. J., 2008), in quanto non vi è differenziazione per un fattore basilare come il genere e per le caratteristiche morfologiche di base quali larghezza delle spalle, larghezza ossea del bacino; ma soprattutto, non è integrato dalla tipologia di corporatura, poiché non vi è distinzione tra massa grassa e magra (muscolare) (World Health Organization, 2004). Ad esempio, un soggetto di 90 kg e 175 cm di altezza può essere normopeso, se ha una percentuale di massa magra

(muscolare) maggiore della percentuale di massa grassa. Nonostante ciò, il BMI è molto spesso utilizzato per un'analisi preliminare dello stato di peso-forma.

Il BMI è l'indice utilizzato a livello internazionale per definire (attraverso intervalli dell'indice stesso) categorie ponderali condivise a livello internazionale, pertanto il BMI è stato calcolato per ogni individuo misurato. A seconda del valore di BMI calcolato, ogni individuo è stato associato ad una certa categoria, coerentemente con quanto dichiarato dall'Organizzazione mondiale della sanità (o World Health Organization, WHO in inglese):

- Sottopeso: $BMI < 18.5$
- Normopeso: $18.5 \leq BMI \leq 24.9$
- Sovrappeso: $25.0 \leq BMI \leq 29.9$
- Obeso: $BMI \geq 30.0$

Il grafico a torta in figura 2.31 mostra la distribuzione delle categorie di BMI per l'intera popolazione maschile misurata (età media 43 anni). Si può notare che quasi la metà della popolazione (48%) è sovrappeso; questo dato è ancora più critico se a questa fetta della popolazione si somma il 21% delle persone nella fascia dell'obesità.

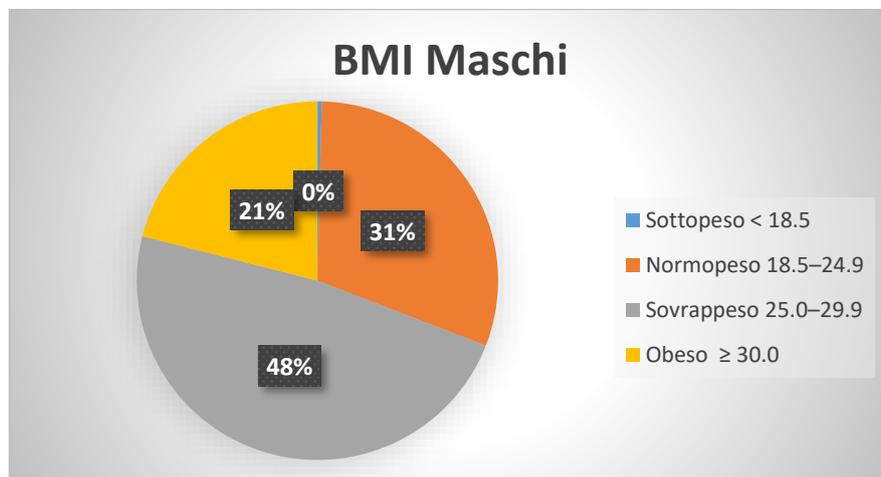


Figura 2.31: Distribuzione percentuale delle categorie di BMI per il totale del campione maschile

In figura 2.32, invece, è mostrata la distribuzione delle categorie di BMI per la popolazione femminile (età media 44 anni). Si può notare che per le donne, la percentuale della popolazione normopeso è maggiore rispetto agli uomini (52%

contro 31%). Di conseguenza, la somma tra la fetta sovrappeso e quella dell'obesità è meno critica e non supera la metà della popolazione (46%). Inoltre, nel grafico del database femminile compare anche una fetta, seppur piccola (2%) di persone sottopeso.

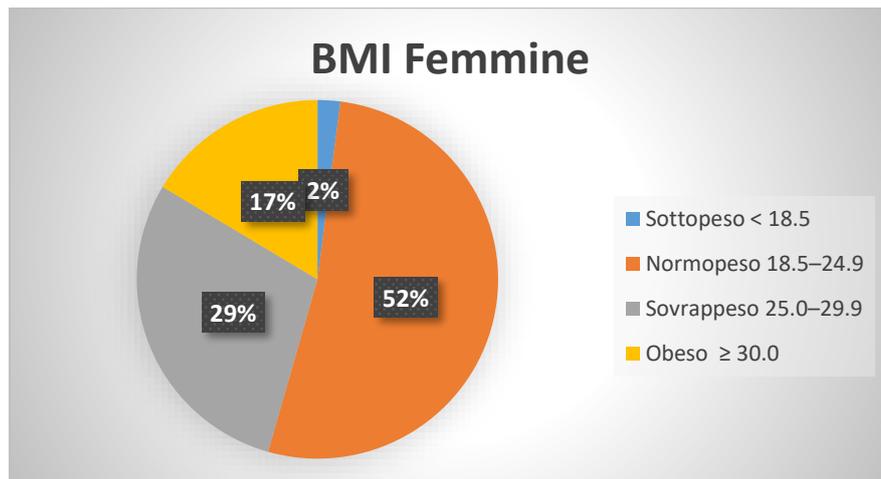


Figura 2.32: Distribuzione percentuale delle categorie di BMI per il totale del campione femminile

Inoltre, essendo il BMI un parametro fortemente influenzato dall'età (Jackson, A. S., et al., 2002), il campione è stato anche suddiviso in 5 classi di età (18-25, 26-35, 36-45, 46-55, 56-65). Infatti, nella figura 2.33 sono stati raggruppati i grafici a torta delle categorie di BMI della popolazione maschile suddivisa in fasce di età (il numero di persone misurate per ogni classe di età è riportato nella tabella 2.3).

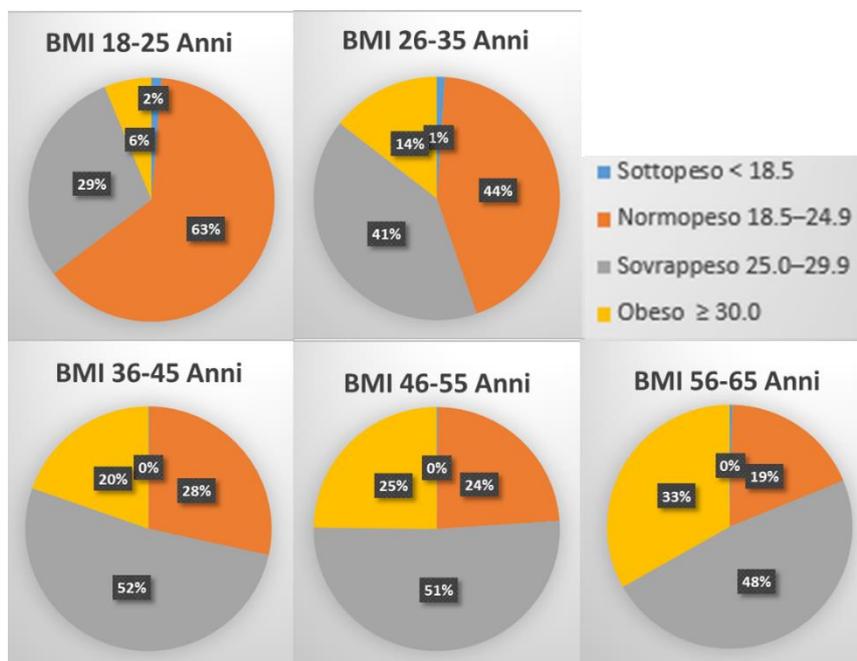


Figura 2.33: Distribuzione percentuale delle categorie di BMI per il totale del campione maschile suddiviso per classi di età

Osservando i grafici, si nota che la percentuale di persone normopeso è massima nella classe di età più giovane (63%) e diminuisce progressivamente considerando fasce di età più avanzata. Viceversa, l'obesità è crescente con l'aumento dell'età; il dato è critico per la fascia di età 56-65 anni, dove oltre l'80% della popolazione è sovrappeso o obesa. In questo caso è stato effettuato un test della varianza ANOVA a singolo fattore con un livello di significatività $\alpha = 0.05$, che ha evidenziato una differenza significativa tra almeno una coppia di classi di età ($p < 0.001$).

Come per la figura 2.33, nella figura 2.34 sono raggruppati i grafici delle categorie di BMI della popolazione femminile nelle stesse cinque fasce di età. Il numero di persone misurate per ogni classe di età è riportato nella tabella 2.6. Le variazioni delle percentuali delle classi delle categorie di BMI con l'età nella popolazione femminile seguono gli stessi andamenti della popolazione maschile, infatti le percentuali di obesità crescono con l'età, sebbene mediamente il BMI è più basso.

La massima percentuale dei normopeso è nella fascia più giovane (70%), ma decresce con l'età fino al minimo della fascia più anziana (32%). Un altro dato da

sottolineare è la presenza del 7% di persone sottopeso nella fascia più giovane della popolazione femminile. Anche per il campione femminile è stato effettuato un test della varianza ANOVA a singolo fattore con un livello di significatività $\alpha = 0.05$, che ha evidenziato una differenza significativa tra almeno una coppia di classi di età ($p < 0.001$).

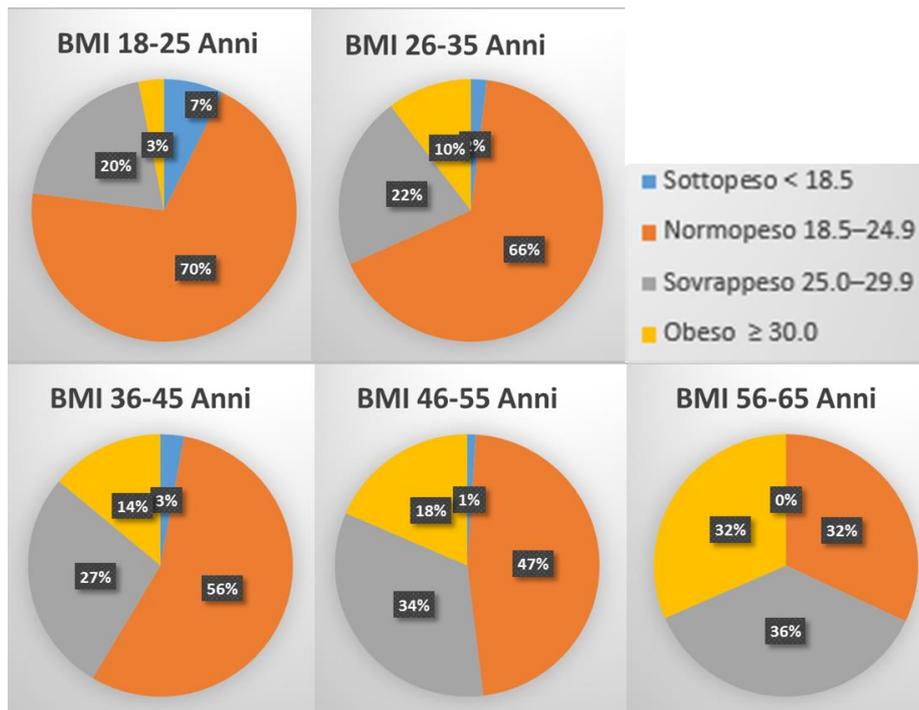


Figura 2.34: Distribuzione percentuale delle categorie di BMI per il totale del campione femminile suddiviso per classi di età

Infine, come per la statura, anche il BMI è stato studiato suddividendo il campione per aree geografiche (il numero di persone misurate per ogni classe di età è riportato nella tabella 2.9). La figura 2.35 mostra la distribuzione di BMI del campione maschile per le 3 aree geografiche.

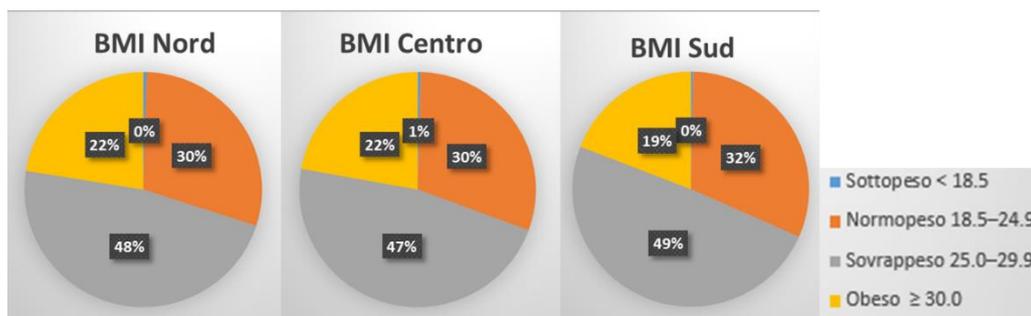


Figura 2.35: Distribuzione percentuale delle categorie di BMI per il totale del campione maschile suddiviso per aree geografiche

Osservando i grafici, non si notano particolari differenze nella distribuzione delle classi di BMI dovute alla variabile geografica per il campione maschile. In nessun caso vi è differenza statistica per un livello di significatività $\alpha = 0.05$ (Nord/Centro $p = 0.97$, Centro/Sud $p = 0.18$, Nord/Sud $p = 0.26$).

Invece, la figura 2.36 mostra la distribuzione di BMI del campione femminile per le 3 aree geografiche.

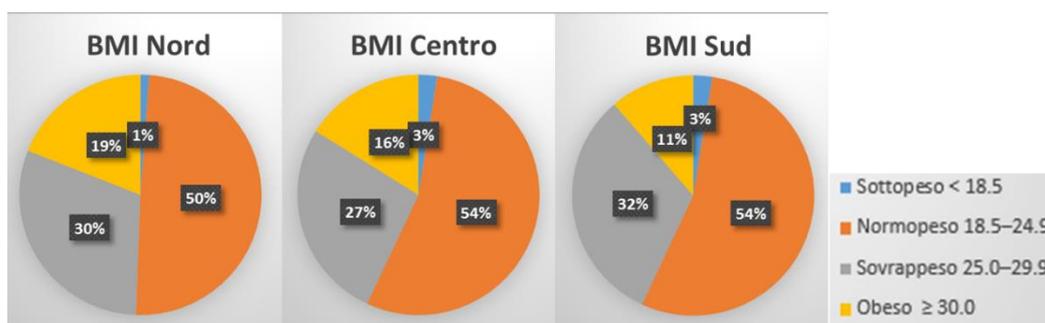


Figura 2.36: Distribuzione percentuale delle categorie di BMI per il totale del campione femminile suddiviso per aree geografiche

Osservando i grafici, diversamente dal campione maschile, le differenze nella distribuzione delle classi di BMI dovute alla variabile geografica per il campione femminile non sono marginali. Le differenze tra le distribuzioni di BMI tra Centro e Sud sono contenute (Centro/Sud $p = 0.38$), infatti differiscono solo le classi sovrappeso e obeso del 5%, mentre il Nord presenta una distribuzione del BMI significativamente differente (Nord/Centro $p = 0.002$, Nord/Sud $p = 0.003$). Nello specifico, il Nord presenta la minore percentuale di soggetti normopesi (50%) e la maggiore percentuale di soggetti obesi (19%).

Capitolo 3

Generazione dei manichini virtuali

3.1 Introduzione

Nella progettazione di postazioni di lavoro, macchinari o strumenti di lavoro è di uso comune fare riferimento alle caratteristiche antropometriche della popolazione che ne farà uso. Le misurazioni antropometriche (quando disponibili) forniscono dati che possono essere consultati per le popolazioni di interesse. Per alcuni problemi di progettazione, può essere un'applicazione relativamente semplice, in particolare quando si tratta di un problema "univariato", ovvero quando la progettazione si può riferire ad una sola misura antropometrica di interesse, poiché le altre misure non influenzano la progettazione. Ad esempio, banalmente, l'altezza di una porta è determinata in funzione della statura della persona più alta che la attraverserà. Ma se si considera anche la larghezza della porta, allora si dovrà tenere in considerazione anche un'altra misura antropometrica relativa alla massima larghezza del corpo, in questo caso il problema diventa "multivariato".

L'esempio dell'attraversamento della porta è un problema "multivariato" relativamente semplice, in quanto le due grandezze antropometriche da considerare sono da riferirsi solo alle persone con statura e larghezza del corpo elevate, mentre le persone con piccola statura e larghezza del corpo non riscontreranno alcun problema. Alla categoria dei problemi "multivariati" fanno anche parte la maggior parte dei problemi di progettazione in cui entra in gioco una restrizione dello spazio di utilizzo, come ad esempio la progettazione di una cabina di pilotaggio di un aereo o una postazione di lavoro in una linea produttiva industriale, dove si deve verificare sia la raggiungibilità dei punti di lavoro lontani che l'accessibilità a quelli più vicini. In questo tipo di problemi, può esservi una non corrispondenza tra le misure antropometriche (anthropometric mismatch), ovvero l'utente limite non è sempre lo stesso percentile di tutte le misure rilevanti per la progettazione. Ad esempio, nella progettazione del posizionamento di un oggetto da prendere su un tavolo, da una posizione seduta, bisogna considerare che la minore distanza raggiungibile da una persona è data dalla combinazione della persona con la massima profondità del corpo (a causa dell'ingombro e del contatto con il tavolo di lavoro) e la minima

lunghezza del braccio, che sono dimensioni antropometriche spesso associate a utenti limite differenti (P5F lunghezza braccio, P95M profondità del corpo).

Nella fase di progettazione, quindi, non è consigliato riferirsi solo all'uomo medio, innanzitutto perché si deve garantire il confort ergonomico di usabilità a tutta (o parte) della popolazione. Inoltre, non esiste una misura media dell'uomo, in quanto non esiste una perfetta correlazione tra le dimensioni dei vari segmenti corporei. Infatti, il concetto di "uomo medio" è soltanto un'astrazione, poiché non esiste alcun individuo che abbia per tutti i dati antropometrici il valore medio riscontrato in una campagna di misurazione.

Tipicamente, gli individui che riscontrano maggiormente problemi di utilizzabilità di un prodotto o nello svolgere un certo compito lavorativo sono quelli vicini alle code della distribuzione. Quindi, i dati antropometrici sono impiegati in fase di progetto adottando uno dei seguenti approcci:

- Progettazione per estremi: si utilizza questo approccio quando si deve garantire l'usabilità dell'intera distribuzione della popolazione. A seconda dell'oggetto della progettazione si sceglie il dimensionamento per l'estremo superiore o inferiore. Ad esempio, se si progetta l'altezza di una porta, il riferimento è l'estremo superiore della popolazione se si vuole accogliere tutta la popolazione; mentre, ad esempio, se si sta progettando la forza da esercitare per un azionamento si considera l'estremo inferiore della popolazione se si desidera accomodare tutta la popolazione.
- Progettazione per intervallo: con questo approccio si garantisce il confort di utilizzabilità e l'accomodamento di una certa percentuale della popolazione. E' l'approccio più utilizzato per la progettazione delle postazioni di lavoro, ed è pratica comune, date le indicazioni delle linee guida per la progettazione ergonomica, coprire un intervallo del 90% (dal 5° percentile femminile al 95° percentile maschile).

In progettazione, spesso si deve raggiungere un compromesso e decidere che non è conveniente, dal punto di vista economico, accomodare tutte le persone che potrebbero utilizzare l'oggetto di studio. Tornando all'esempio dell'altezza della porta, si potrebbe decidere che il 95% delle persone possa attraversare la porta senza alcun problema, mentre il restante 5% delle persone più alte debba accettare l'inconveniente di piegarsi (Haslegrave, C. M., 1986). Questo esempio semplificativo è tipico di molte decisioni da prendere in problemi di progettazione

più complessi, dove molto spesso i limiti di un progetto sono scelti per accomodare una parte della popolazione (tipicamente il 90-95%).

I metodi più comuni per applicare i dati antropometrici alla valutazione ergonomica di un prodotto o di una postazione di lavoro sono rimasti immutati per decenni (Roebuck, 1995). L'ergonomo o il progettista identificano le dimensioni del corpo umano correlate al problema di progettazione, dopodiché, cercano informazioni sulle misure antropometriche selezionate in un testo di riferimento, in un manuale sui fattori antropometrici o su una banca dati antropometrica (Peacock and Karwowski, 1993; HFES 300 Committee, 2004; Salvendy, 2012; Jung et al., 2009). Questo approccio di applicazione dei dati antropometrici ha molte limitazioni e il problema più critico è l'assunzione che i database di riferimento rappresentino accuratamente la popolazione utilizzatrice. Purtroppo, molto spesso non è questo il caso e le fonti dei dati antropometrici tabulati non sono così specifiche o aggiornate, in generale la popolazione campione è differente dalla popolazione in esame. Le linee guida per la progettazione sono spesso basate su studi militari, che storicamente rappresentano gli studi antropometrici più dettagliati, come la "1988 U.S. Army anthropometric survey" conosciuta come ANSUR (Gordon et al., 1989). I dati ANSUR pubblicati, con oltre 100 variabili antropometriche misurate su oltre 4000 soggetti, forniscono un eccellente riferimento sulle dimensioni del corpo per l'esercito americano a partire dalla fine degli anni '80, ma l'etnia, l'età e l'idoneità della popolazione ANSUR sono molto diversi da quelli della popolazione attuale e generale degli Stati Uniti, o ancora peggio, dalla probabile popolazione di utenti per qualsiasi prodotto o spazio di lavoro. Per questo motivo, alcuni studi hanno indagato sulla possibilità di ottenere modelli di regressione per la stima di misure antropometriche di interesse da altre, usando ad esempio la statura come "descrittore". In questo modo, i cambiamenti nella popolazione che vengono catturati nei descrittori possono quindi essere utilizzati per estrapolare nuovi valori per l'antropometria specifica (Drillis e Contini, 1966, Kinghorn e Bittner, 1995; Fromuth and Parkinson, 2008). Sono stati usati anche modelli più complessi come le reti neurali (Dursun Kaya et al., 2003), oppure metodologie che utilizzano le informazioni demografiche disponibili riesaminando i dati antropometrici esistenti per produrre nuovi set di dati sintetizzati che rappresentano meglio la popolazione degli utenti di riferimento (Parkinson, M. B., & Reed, M. P., 2010). Questi metodi sfruttano le correlazioni tra le misure antropometriche (ad esempio con l'analisi delle componenti principali) per produrre stime migliori delle distribuzioni di variabili rispetto a quelle ottenute con le normali procedure di regressione lineare.

Dato il sempre più largo uso della modellazione umana virtuale, in linea con le diverse problematiche che si possono presentare in fase di progettazione, sono nati diversi approcci con cui generare i manichini utilizzati per la progettazione nell'ambiente virtuale.

3.2 Tipologie di manichini virtuali

Con lo sviluppo dei DHM software ed il sempre più vasto uso che se ne fa in ambito industriale, è diventato di fondamentale importanza utilizzare dei modelli antropometrici per i manichini virtuali validi ed affidabili, basati sulle banche dati antropometriche disponibili.

I manichini virtuali nascono come modelli 2D o catene cinematiche utilizzate per studiare e simulare gli spazi necessari di un individuo durante una certa attività. I primi sistemi di questo tipo sono composti da una serie di segmenti rigidi che simulano la lunghezza delle parti del corpo, collegati tra loro mediante giunti che simulano i gradi di libertà delle articolazioni permettendone una movimentazione simile a quella del corpo umano. In seguito, questi modelli si sono evoluti in manichini 3D, con un numero di gradi di libertà sempre maggiore, in modo da simulare con sempre maggior accuratezza i movimenti del corpo. Questi modelli sono stati arricchiti con masse e volumi delle diverse parti del corpo, che hanno permesso di implementare modelli muscolo-scheletrici per le valutazioni biomeccaniche.

Per facilitare le analisi, il numero di manichini virtuali usati per le verifiche di progetti generalmente sono due o tre. Tipicamente per un'analisi sono utilizzati una donna "piccola" e un uomo "grande", che sono selezionati spesso per rappresentare i limiti della variabilità della popolazione. Per un problema "univariato" le dimensioni dei manichini sono scelte in modo che l'intervallo di variabilità che si rappresenta sia quello che accomodi una certa percentuale della popolazione (HFES 300 Committee, 2004). Per esempio, accomodare il 95% della popolazione potrebbe guidare il progettista ad utilizzare manichini del 2.5° e 97.5° percentile della misura di interesse (ad esempio statura). Nonostante l'intervallo centrale sia il più utilizzato, a seconda della tipologia del problema potrebbe essere utile riferirsi all'intervallo inferiore (1°-95° percentile) o quello superiore (5°-99° percentile).

Garneau e Parkinson (2011) nel corso del loro studio hanno analizzato diversi approcci con cui generare manichini, applicandoli ad un caso studio e valutando i vantaggi e gli svantaggi in termini di percentuale della popolazione accomodata. Gli autori hanno generato manichini utilizzando costanti di proporzionalità, o

derivandoli da misure antropometriche di banche dati disponibili in letteratura. Sebbene i manichini siano stati utilizzati per una singola applicazione di progettazione di un problema univariato, questi approcci sono stati ripresi in questo capitolo e illustrati nel dettaglio nei seguenti paragrafi.

3.2.1 Manichini derivati da costanti di proporzionalità

Questo approccio è probabilmente il più semplice con cui è possibile generare un manichino. Con questo metodo, le lunghezze dei segmenti dei manichini sono determinate usando delle costanti di proporzionalità, che rappresentano la media delle lunghezze di una particolare parte del corpo come rapporto rispetto alla statura.

Dal momento che statura e peso sono le grandezze antropometriche più comunemente disponibili nelle banche dati antropometriche, spesso sono usate le costanti proporzionali rispetto alla statura proposte da Drillis e Contini (1966) mostrate in figura 3.1. Questo metodo rappresenta sicuramente il più veloce e facile da attuare, tuttavia il grado approssimativo di accuratezza del modello antropometrico lo ha reso sempre meno usato con gli anni, poiché la correlazione tra la statura e le diverse parti del corpo è molto variabile e non sempre sufficientemente alta. Inoltre, questo metodo non permette di tenere in considerazione le differenze morfologiche tra le diverse popolazioni.

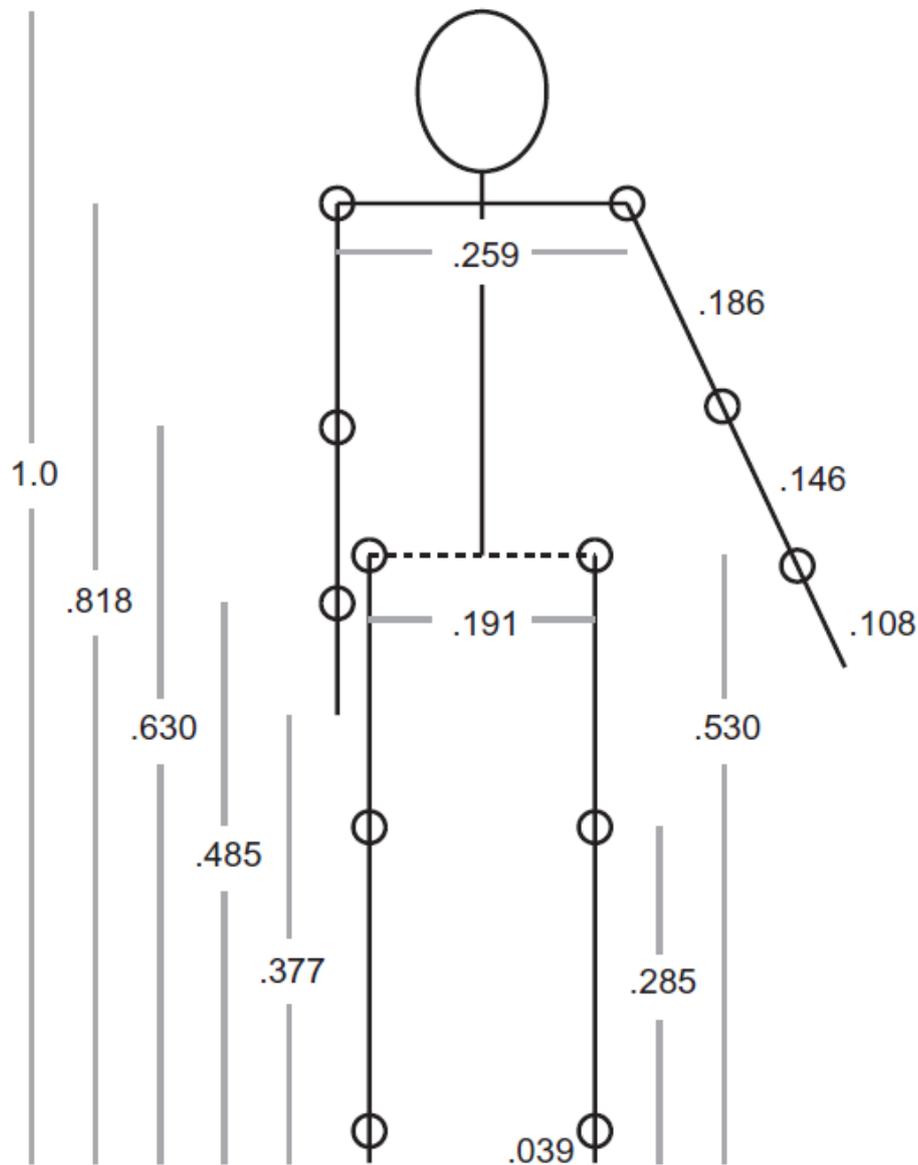


Figura 3.1: Costanti proporzionali delle dimensioni corporee (Drillis & Contini, 1966)

3.2.2 Manichini derivati da banche dati

Altri manichini virtuali sono stati generati utilizzando direttamente le misure antropometriche presenti nelle banche dati. In letteratura i database più completi a cui si fa riferimento spesso sono relativi a gruppi specifici della popolazione, come la ANSUR I-II (Gordon et al., 1989; Gordon et al., 2014) che sono due campagne

antropometriche effettuate nel 1988 e nel 2012 sulla popolazione militare americana o la CAESAR (Harrison, C. R., & Robinette, K. M., 2002) relativa alla popolazione civile.

La categoria dei manichini ottenuti dalle banche dati antropometriche può essere a sua volta suddivisa per le diverse metodologie utilizzate:

Approccio percentile classico

Nella rappresentazione di un manichino percentile classico, tutte le misure antropometriche di un particolare manichino virtuale, ricadono nello stesso percentile della popolazione di riferimento. Per ogni misura antropometrica, il percentile è calcolato sull'intera banca dati della relativa popolazione.

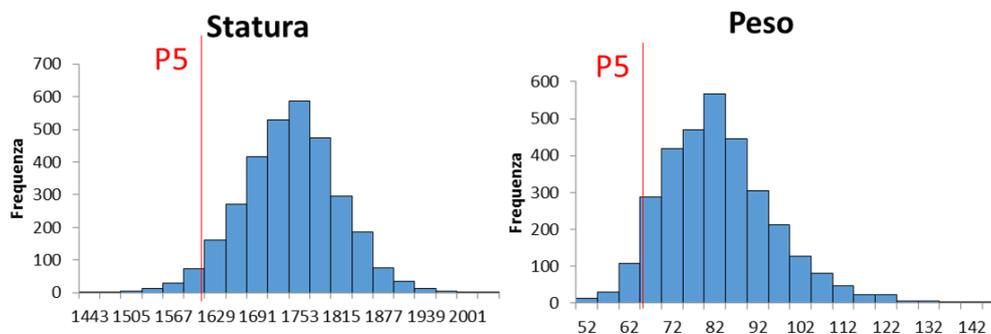


Figura 3.2: Esempio di P5 con approccio percentile classico

Ad esempio nelle figure 3.2 è rappresentato il valore corrispondente al 5° percentile di statura e peso dalla distribuzione dei dati dei soggetti maschili del progetto: “La Fabbrica si Misura”. Con questa assunzione il 5° percentile maschile è costruito con il 5° percentile di ogni misura antropometrica rilevata nella campagna di misurazione. Questo approccio è stato ampiamente usato per la generazione dei manichini virtuali implementati in diversi software DHM poiché è possibile applicarlo anche se la banca dati di riferimento è aggregata, ossia se sono noti soltanto alcuni parametri delle analisi statistiche come media e deviazione standard (nell'ipotesi che la distribuzione sia normale).

Tuttavia questo approccio è stato ampiamente criticato già molti anni fa (McConville, J. T., & Churchill, E., 1976). E' stato fatto notare, che non è valido assumere che tutte le dimensioni del corpo di un certo percentile sono rappresentative del relativo percentile della distribuzione della popolazione. Questo non sarebbe corretto né statisticamente (poiché è noto che la correlazione tra alcune

misure corporee è bassa) né in termini pratici. Infatti, nel loro studio, McConville e Churchill (1976) portarono un esempio significativo, in cui considerando il 95° percentile di tutte le misure antropometriche dei segmenti verticali; sommando tutti i segmenti verticali del medesimo percentile hanno ottenuto un manichino con una statura 30 cm maggiore del valore del 95° percentile di statura. Ad esempio, con questo approccio, il P5 rappresenta un manichino molto basso, leggero, con braccia e gambe corte, ma anche con contenute larghezze e profondità di spalle e vita; viceversa, un P95 rappresenta un manichino alto, pesante, con braccia e gambe lunghe, ma anche con ampie larghezze di spalle e fianchi e profondità del corpo.

Approccio Human scale standard

Con la rappresentazione di un manichino con l'approccio Human Scale Standard (HSS) si suddivide il database antropometrico rispetto ad una misura antropometrica di riferimento e si calcolano le medie delle altre misure antropometriche per ogni suddivisione del database. La misura che generalmente si sceglie come riferimento è la statura, quindi si divide il database in un certo numero di fasce scegliendo una dimensione costante dell'intervallo.

Per poterlo applicare, è necessario disporre di una banca dati non aggregata della popolazione di riferimento, soltanto in questo modo si può suddividere la banca dati in sottogruppi di statura per calcolare la media delle restanti misure antropometriche. Inoltre, dato che la distribuzione delle misurazioni tende ad una normale, è necessario disporre di un database di dimensioni considerevoli per assicurare un'affidabilità dei dati sufficiente (soprattutto nelle code della distribuzione dove il numero di misurazioni è ovviamente minore).

Con questo approccio, il P5 rappresenta un manichino molto basso, ma che presenta le restanti misure antropometriche medie per un individuo della sua altezza; viceversa, un P95 rappresenta un manichino molto alto, ma che presenta le restanti misure antropometriche medie per un individuo della sua altezza. L'approccio HSS è preferito all'approccio percentile classico in determinate applicazioni come per le analisi biomeccaniche. Infatti, in questo tipo di applicazioni, l'utilizzo di un manichino P95 con percentile classico porterebbe a considerare un individuo molto alto, ma anche molto pesante, con conseguente rischio di sovrastimare i carichi biomeccanici; viceversa, un P5 con percentile classico rappresenterebbe un individuo basso e leggero, con il rischio di sottostimare i carichi biomeccanici rispetto al manichino del medesimo percentile generato con approccio HSS. Inoltre, questo approccio si mostra adatto a problemi multivariati in presenza di "mismatch", come l'esempio portato nel §3.1, dove un

P5F con approccio HSS non porterebbe a considerare un individuo con una lunghezza del braccio e una profondità del corpo minima come con l'approccio percentile classico, ma un manichino di statura molto piccola con una lunghezza del braccio e una profondità del corpo medie per le persone quella statura (la lunghezza del braccio sarà piccola perché correlata alla statura, diversamente dalla profondità del corpo).

3.2.3 Manichini multivariati

Negli ultimi anni, molte aziende manifatturiere hanno cominciato il passaggio dal tradizionale approccio percentile al modello di progettazione multivariato. L'approccio di progettazione dal 5° al 95° percentile è stato criticato per la diminuzione del grado di accomodamento quando due o più dimensioni sono coinvolte nella progettazione (Zehner, G. F. et al., 1993). L'approccio di modellazione multivariata offre soluzioni migliori per la progettazione delle postazioni di lavoro perché riesce a considerare le problematiche relative a tutte le misure antropometriche coinvolte.

Con l'approccio di modellazione multivariata, si utilizza l'analisi delle componenti principali (PCA) (Jolliffe, I. T., 1986) per ridurre un certo numero di dimensioni del corpo a un numero minore (in genere due o tre) di variabili o componenti principali (PC). La PCA produce combinazioni lineari delle variabili di origine per generare degli assi di un nuovo sistema di riferimento, anche chiamati PC.

Data una matrice con p variabili e n campioni, innanzitutto, i dati sono centrati nelle medie di ogni variabile, così da assicurare che la nuvola di dati sia centrata nell'origine delle PC, senza influenzare la relazione tra i dati o la varianza tra le variabili (Holland, S. M., 2008). La prima componente principale (Y_1) è data dalla combinazione lineare delle variabili iniziali X_1, X_2, \dots, X_p (3.1)

$$Y_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1p}X_p \quad (3.1)$$

Oppure in notazione matriciale (3.2)

$$Y_1 = a_1^T X \quad (3.2)$$

La prima componente principale è calcolata in modo da tenere in considerazione la maggiore varianza possibile dei dati. Scegliendo grandi valori per i coefficienti $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1p}$, la varianza di Y_1 risulta la più alta possibile. Per questo

motivo, i coefficienti sono calcolati con il vincolo che la somma dei loro quadrati sia 1 (3.3).

$$a_{11}^2 + a_{12}^2 + \dots + a_{1p}^2 = 1 \quad (3.3)$$

La seconda componente principale è calcolata nello stesso modo, con la condizione che sia non correlata (e quindi perpendicolare) alla prima PC e che tenga in considerazione la seconda varianza più alta possibile (3.4).

$$Y_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2p}X_p \quad (3.4)$$

Allo stesso modo, il calcolo delle PC continua fino ad un totale di p componenti principali, uguale al numero delle variabili originali. A questo punto, la somma della varianza di tutte le componenti principali sarà uguale alla somma della varianza di tutte le variabili iniziali. Raggruppando tutte le trasformazioni delle variabili originali nelle componenti principali, risulta (3.5)

$$Y = X A \quad (3.5)$$

Le righe della matrice A sono gli “autovettori” della matrice di covarianza dei dati originali, mentre gli elementi di un autovettore sono i coefficienti a_{ij} , anche definiti “loadings”. Gli elementi nella diagonale della matrice di covarianza delle componenti principali sono invece gli “autovalori”, che sono la varianza di ogni componente principale. Gli autovalori sono decrescenti dalla prima componente principale all’ultima e vengono spesso disegnati su un grafico per mostrare la diminuzione di varianza per ogni componente principale aggiunta. La figura 3.3 mostra un esempio dell’andamento della varianza rispetto al numero di componenti principali considerate, come precedentemente accennato, la funzione è monotona decrescente e l’influenza di ogni componente principale successiva è minore.

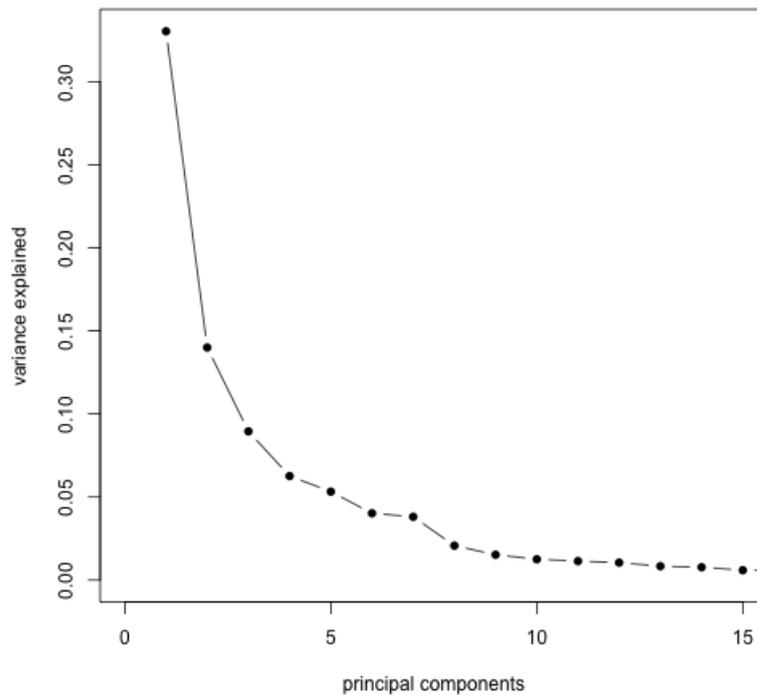


Figura 3.3: Esempio di contributo sulla varianza del numero di componenti principali (http://genomicsclass.github.io/book/pages/pca_svd.html)

Le posizioni di ogni dato nel nuovo sistema di coordinate delle componenti principali sono chiamati “punteggi” e sono calcolati come combinazione lineare delle variabili originali e dei coefficienti a_{ij} . Per esempio, il valore campione r sulla componente principale k è calcolato come (3.6)

$$Y_{rk} = a_{1k}x_{r1} + a_{2k}x_{r2} + \dots + a_{pk}x_{rp} \quad (3.6)$$

La riduzione di dimensione, cioè considerare solo alcune componenti principali rispetto a tutte le variabili iniziali, è l’obiettivo primario della PCA. Infatti, a questo proposito, diversi criteri sono stati proposti per determinare quante PC dovrebbero essere considerate e quante trascurate. Un criterio è quello di trascurare le PC quando offrono solo un incremento marginale nella totale varianza, mentre un secondo criterio è quello di includere PC fino a raggiungere un determinato valore di varianza totale, come il 90%.

Infine, è importante sottolineare che la PCA è soggetta alle stesse restrizioni delle regressioni, in particolare la normalità multivariata. Infatti, la distribuzione di

ogni variabile dovrebbe esser controllata per assicurare la normalità e correggere elevati gradi di asimmetria. (Holland, S. M., 2008)

Le componenti principali approssimano una distribuzione a forma di ellisse o ellissoide, che permette ai progettisti di scegliere il livello desiderato di accomodamento per la popolazione di riferimento. A questo punto, un certo numero di modelli antropometrici, e quindi di corrispondenti manichini virtuali, possono essere identificati sulla superficie di contorno dell'ellissoide (Figura 3.3). I manichini scelti con questa metodologia non comprendono soltanto individui grandi, piccoli, leggeri o pesanti, ma rappresentano individui con differenti proporzioni corporee (Zehner, G. F. et al., 1993). I modelli umani multivariati ottenuti con questo approccio, anziché con quello del percentile classico, sono più realistici e permettono di progettare garantendo un maggiore grado di accomodamento.

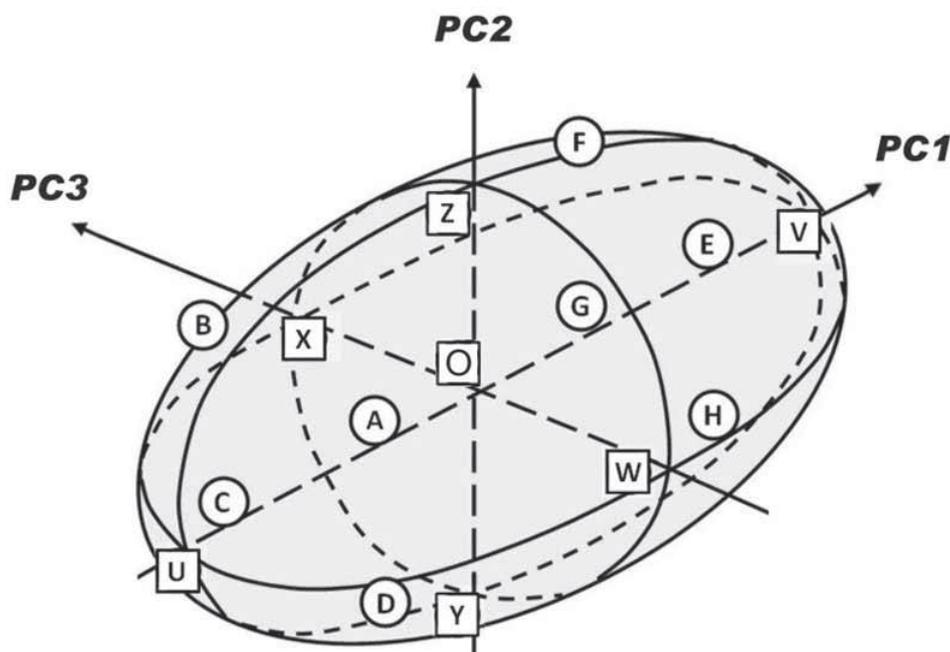


Figura 3.4: Ellissoide di inclusione nel sistema di riferimento delle componenti principali (Guan, J. et al., 2012)

Più recentemente, questa metodologia è stata utilizzata per assistere la progettazione delle cabine di guida dei camion. Dato che l'antropometria degli autisti americani di camion ha mostrato differenze significative dalla popolazione generale, la PCA e la modellazione multivariata hanno permesso di creare dei

manichini più realistici ed accurati per la progettazione di queste postazioni di guida (Guan, J. et al.,2012).

3.3 Manichini con il database: “La Fabbrica si Misura”

In questa sezione saranno presentati i manichini virtuali generati a partire dai dati del progetto: “La Fabbrica si Misura”, raccolti da Ottobre 2016 a Settembre 2017. I modelli antropometrici saranno ottenuti mediante i diversi approcci introdotti in questa sezione.

3.3.1 Costanti di proporzionalità

Utilizzando le costanti proporzionali proposte da Drillis e Contini (1966) sono state calcolate alcune misure antropometriche rispetto alla statura stimata per i percentili 5°, 50° e 95° del database diviso per genere. Sono state stimate le misure antropometriche per cui è stata definita una costante di proporzionalità (figura 3.1). La tabella 3.1 mostra sia il valore della costante di proporzionalità, che i valori stimati per i tre percentili maschili e femminili delle misure antropometriche a partire dalla statura.

Tabella 3.1: Manichini ottenuti tramite costanti di proporzionali delle dimensioni corporee (i valori di tutte le misure antropometriche sono espressi in mm).

Misura antropometrica	Costante proporzionale	Percentili					
		P50M	P5M	P95M	P50F	P5F	P95F
Statura	1,000	1727	1609	1840	1596	1492	1702
Altezza spalla	0,818	1413	1316	1505	1306	1220	1392
Altezza gomito	0,630	1088	1014	1159	1005	940	1072
Altezza trocantere	0,530	915	853	975	846	791	902
Altezza nocca	0,431	744	693	793	688	643	734
Altezza tibiale	0,285	492	459	524	455	425	485

Larghezza spalle (biacromiale)	0,259	447	417	477	413	386	441
Larghezza fianchi	0,191	330	307	351	305	285	325

Le costanti proporzionali permettono di ottenere alcune importanti misure antropometriche utilizzate in progettazione dalla sola stima della statura della popolazione di riferimento. Nonostante ciò, come si evince dalla tabella, il metodo presenta alcuni limiti come la non differenziazione per genere delle costanti di proporzionalità e la derivazione delle misure di larghezza dalla statura (che come è stato visto nei capitoli precedenti non presentano un'elevata correlazione).

3.3.2 Approccio percentile classico

La tabella 3.2 è stata ottenuta con un approccio percentile classico, dove il valore di ogni misura antropometrica è stato ottenuto stimando il relativo percentile per ogni variabile del database. Anche in questo caso sono stati ottenuti il 5°, 50° e il 95° percentile maschile e femminile.

Tabella 3.2: Manichini ottenuti tramite approccio percentile classico (i valori di tutte le misure antropometriche sono espressi in mm, tranne il Peso in kg).

Misura antropometrica	P50M	P5M	P95M	P50F	P5F	P95F
Peso	80	63	104	63	49	90
Statura	1727	1609	1840	1596	1492	1702
Altezza Occhio	1618	1500	1727	1492	1394	1595
Altezza cervicale	1495	1381	1604	1374	1276	1475
Altezza spalla	1431	1321	1540	1318	1220	1417

Altezza gomito	1063	970	1164	984	902	1083
Altezza trocantere	900	810	1004	854	762	948
Altezza nocca	746	672	826	701	632	777
Altezza tibiale	449	365	548	418	335	502
Profondità corpo	258	186	336	250	189	331
Larghezza spalle (biacromiale)	395	320	462	350	287	406
Larghezza gomito-gomito	475	388	559	409	324	508
Larghezza fianchi	352	280	416	349	240	432

Osservando la tabella 3.2 si può notare che dal 5° al 95° maschile si copre una variabilità di statura di 231 mm, mentre per le donne di 210 mm. Un riscontro importante riguarda le stature dei manichini di diverso genere, infatti si nota che il P95F è 25 mm più basso del P50M, ma ciò nonostante il P95F pesa 10 kg in più dell'uomo medio e presenta tutte le misure di larghezza e profondità corporee maggiori. Invece, i manichini più simili sono il P5M ed il P50F che presentano solo 13 mm di differenza in statura e lo stesso peso, le misure delle altezze sono confrontabili tranne quelle relative al trocantere, la nocca e la tibia che, nonostante di statura minore, sono maggiori nel manichino P50F. Questa caratteristica può essere generalizzata, dato che tutti i dati della tabella in esame confermano che la donna presenta un'altezza trocanterica, della nocca e della tibia maggiore degli uomini anche a parità di statura. Questo discorso si può estendere anche per le misure di larghezza e profondità del corpo, che come anticipato non sono molto correlate alla statura e risultano maggiori nel P95F che nel P50M.

3.3.3 Human Scale Standard (HSS)

Nell'applicare l'approccio HSS il database antropometrico, per ogni genere, è stato suddiviso in classi rispetto alla statura. La dimensione di ogni classe è costante, nello specifico, per gli uomini è 5 cm, mentre per le donne è di 4 cm.

La distribuzione della statura è stata suddivisa in 7 classi sia per gli uomini che per le donne, assicurando che nelle classi estreme, che rappresentano le code della distribuzione, la stima sia effettuata su almeno 50 soggetti. Per garantire che la dimensione dell'intervallo di ogni classe sia costante, alcune misurazioni che rappresentano le code della distribuzione sono state eliminate e non sono state considerate in questa analisi.

La tabella 3.3 mostra il numero di misurazione per ognuna delle 7 fasce in cui è suddiviso il database maschile e femminile. Inoltre, sono mostrati i valori limite dell'intervallo scelto per ogni classe di statura.

Tabella 3.3: Classi di statura per approccio HSS

Classe	Maschi		Femmine	
	N	Valori limite (mm)	N	Valori limite (mm)
1	77	1542-1591	100	1460-1499
2	270	1592- 1641	264	1500-1539
3	592	1642-1691	457	1540-1579
4	881	1692-1741	501	1580-1619
5	747	1742-1791	428	1620-1659
6	368	1792-1841	212	1660-1699
7	116	1842-1891	85	1700-1739

Le classi sono numerate in ordine crescente con l'intervallo di statura a cui appartengono. Il numero minore di misurazioni ricade, come prevedibile, nelle classi estreme 1 e 7 (code della distribuzione). Il numero minimo di misurazioni in una fascia per gli uomini è di 77 (Classe 1), mentre per le donne è di 85 (Classe 7).

Per ogni fascia di statura sono state calcolate le medie di ogni altra misura antropometrica, in questo modo sono stati ottenuti i 7 modelli antropometrici corrispondenti a ciascuna classe. Le tabella 3.4 e 3.5 mostrano le classi ottenute per il database maschile e femminile.

Tabella 3.4: Manichini maschili ottenuti tramite approccio HSS (i valori di tutte le misure antropometriche sono espressi in mm, tranne il Peso in kg).

Misura antropometrica	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7
Statura	1542-1591	1592-1641	1642-1691	1692-1741	1742-1791	1792-1841	1842-1891
Altezza Occhio	1469	1516	1562	1610	1654	1703	1745
Altezza cervicale	1360	1401	1444	1488	1533	1578	1613
Altezza spalla	1299	1339	1380	1424	1466	1511	1550
Altezza gomito	956	992	1024	1059	1093	1129	1154
Altezza trocantere	822	845	870	902	927	954	980
Altezza nocca	671	695	721	743	766	792	809
Altezza tibiale	395	411	427	448	465	489	494

Profondità corpo	259	258	259	257	259	259	261
Larghezza spalle (biacromiale)	362	376	387	392	397	402	407
Larghezza gomito-gomito	458	460	468	473	479	483	488
Larghezza fianchi	332	339	345	349	353	358	360
Peso	71	73	77	80	84	88	92

Tabella 3.5: Manichini femminili ottenuti tramite approccio HSS (i valori di tutte le misure antropometriche sono espressi in mm, tranne il Peso in kg).

Misura antropometrica	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7
Statura	1460- 1499	1500- 1539	1540- 1579	1580- 1619	1620- 1659	1660- 1699	1700- 1739
Altezza Occhio	1388	1423	1460	1495	1533	1569	1605
Altezza cervicale	1274	1310	1344	1378	1415	1446	1483
Altezza spalla	1218	1254	1287	1320	1358	1390	1427
Altezza gomito	907	934	959	989	1020	1046	1072

Altezza trocantere	785	810	831	857	881	903	923
Altezza nocca	643	661	681	703	728	742	771
Altezza tibiale	368	386	402	419	439	453	469
Profondità corpo	255	251	255	252	253	257	254
Larghezza spalle (biacromiale)	343	338	349	349	347	354	350
Larghezza gomito-gomito	410	408	414	413	412	417	407
Larghezza fianchi	342	338	346	346	340	346	347
Peso	60	61	64	65	66	69	69

In generale, le tabelle 3.4 e 3.5 confermano una buona correlazione tra la statura e le varie misure antropometriche delle altezze, poiché al crescere delle fasce individuate i valori delle relative altezze misurate sono maggiori. Invece, la correlazione per le misure di larghezze e profondità è minore, poiché non si manifesta una dipendenza diretta con la statura. Questo comportamento è più evidente per la tabella 3.5, ciò significa che per le donne, le misure di larghezze e profondità del corpo sono ancor meno legate alla statura che per gli uomini.

3.3.4 Confronti e discussioni

I manichini ottenuti con gli approcci percentile classico, costanti di proporzionalità e HSS sono stati confrontati allo scopo di evidenziarne le differenze o le similitudini, e per guidare un progettista alla scelta dell'approccio più adatto alle esigenze del problema in esame.

La tabella 3.6 mostra un confronto tra i manichini P50M, P5F, P95M ottenuti con approccio percentile classico e costanti proporzionali. Lo scostamento Δ è stato calcolato come la differenza tra il valore della relativa misura antropometrica dell’approccio costanti proporzionali e quello classico; dunque, un valore positivo significa una sovrastima dell’approccio con costanti proporzionali.

Tabella 3.6: Confronto tra manichini ottenuti tramite approccio percentile classico e costanti proporzionali (i valori di tutte le misure antropometriche sono espressi in mm). Lo scostamento è calcolato come: $\Delta = (\text{Costanti}-\text{Classico})$.

Misura antropometrica	P50M			P5F			P95M		
	Classico	Costanti	Δ	Classico	Costanti	Δ	Classico	Costanti	Δ
Statura	1727	1727	0	1492	1492	0	1840	1840	0
Altezza spalla	1431	1413	-18	1220	1220	0	1540	1505	-35
Altezza gomito	1063	1088	25	902	940	38	1164	1159	-5
Altezza trocantere	900	915	15	762	791	29	1004	975	-29
Altezza nocca	746	744	-2	632	643	11	826	793	-33
Altezza tibiale	449	492	43	335	425	90	548	524	-24
Larghezza spalle	395	447	52	287	386	99	462	477	15
Larghezza fianchi	352	330	-22	240	285	45	416	351	-65

La statura è stata riportata in tabella, nonostante sia la misura rispetto a cui sono state ottenute le costanti proporzionali, e di conseguenza lo scostamento calcolato è nullo. I valori di scostamento in tabella evidenziano che l'approccio con le costanti proporzionali sovrastimano tutte le misure antropometriche nel caso del P5F, mentre sottostimano le misure antropometriche (tranne la larghezza spalle) per il P95M. Invece, per il P50M, alcune misure presentano uno scarto positivo ed altre negativo.

La variabilità sia positiva che negativa dello scarto, nel caso del P50M, sottolinea il grado approssimativo dell'approccio con le costanti proporzionali. Infatti, questo aspetto significa che le stime ottenute con questo metodo oscillano intorno alle reali medie calcolate statisticamente dall'intero database antropometrico. Tuttavia, considerando il manichino P50M, gli scostamenti in valore assoluto sono contenuti entro un massimo di 52 mm (larghezza spalle), che potrebbero essere considerati accettabili, soprattutto tenendo in considerazione la semplicità del metodo di derivazione delle misure antropometriche dalla statura. Tuttavia, i valori di scostamento sono spesso non trascurabili, e per i percentili P5F e P95M oscillano intorno a quelli calcolati per il P50M, raggiungendo per i percentili estremi i valori più critici (90 mm per altezza tibiale del P5F, 99 mm per larghezza spalle del P5F, e 65mm per la larghezza fianchi del P95M). Il confronto evidenzia l'utilità dell'approccio percentile classico per individuare manichini limite, che seppur poco realistici nella rappresentazione di un individuo (come spiegato §3.2.2) hanno lo scopo di massimizzare l'intervallo di accomodamento; invece, l'approccio costanti proporzionali, seppur con tutte le approssimazioni del metodo, per le misure ben correlate alla statura come le proporzioni tra le lunghezze corporee, identifica manichini meglio rappresentativi di un individuo di una certa statura.

Per permettere un immediato confronto, le misure antropometriche dei manichini generati con approccio classico e costanti proporzionali sono state inserite nel software HM. La figura 3.5 mostra i manichini generati con i due approcci, data la simmetria rispetto al piano sagittale, di ogni manichino è mostrata solo una metà e ogni coppia è adiacente per evidenziare le differenze antropometriche. Il dato "Larghezza gomito" è mancante dall'approccio costanti proporzionali, perciò per ottenere la visualizzazione grafica del manichino, il punto antropometrico del gomito è stato allineato con la larghezza spalla (in figura è stato cerchiato per evidenziare che si tratta di un punto "estrapolato").

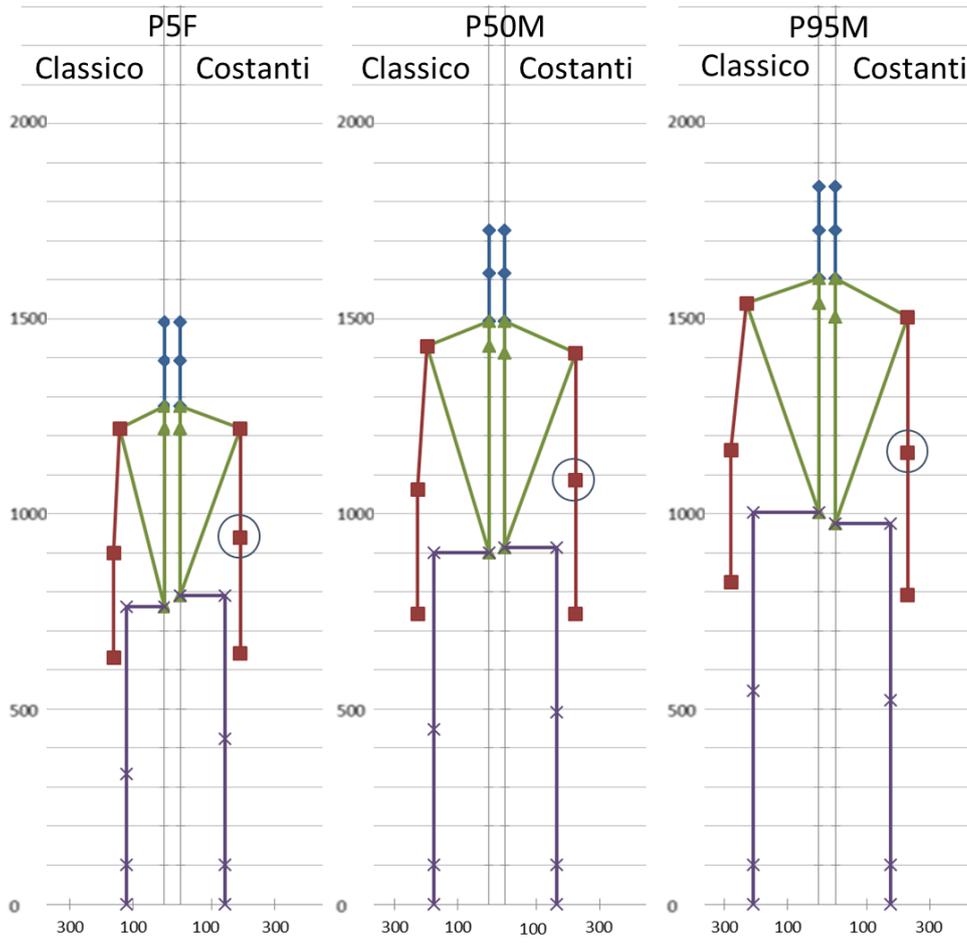


Figura 3.5: Confronto grafico tra manichini P5F/P50M/P95M ottenuti tramite approccio percentile classico e approccio costanti proporzionali. La larghezza del gomito (cerchiata) è stata allineata con la larghezza spalla.

La tabella 3.7 mostra un confronto tra i manichini P50M, P5F, P95M ottenuti con gli approcci percentile classico e HSS. Per rendere confrontabili i manichini sono state scelte le classi, ottenute con l’approccio HSS dai database maschile e femminile (tabella 3.3), che presentano un valore medio di statura simile a quello ottenuto dall’approccio percentile classico.

Nel caso del P50M è stata scelta la classe HSS 4 (statura 1692-1741 mm), il cui valore medio differisce di soli 10 mm dal manichino classico. Invece, i valori di statura dei percentili P5F e P95M ricadono all’incirca nel valore di soglia che separa due classi, dunque, per semplicità, sono state calcolate le medie aritmetiche tra le fasce adiacenti di tutte le misure antropometriche. Per il P5F sono state scelte le classi HSS 1-2 (statura 1460-1539 mm), con una media più alta di 8 mm rispetto al

manichino classico; invece, per il P95M sono state scelte le classi HSS 6-7 (statura 1792-1841 mm) con un valore medio maggiore di appena 2 mm in più rispetto alla statura del manichino classico.

Tabella 3.7: Confronto tra manichini ottenuti tramite approccio percentile classico e HSS (i valori di tutte le misure antropometriche sono espressi in mm, tranne il Peso in kg). Lo scostamento è calcolato come: $\Delta = (\text{HSS}-\text{Classico})$.

Misura antropometrica	P50M			P5F			P95M		
	Classico	HSS 4	Δ	Classico	HSS 1-2	Δ	Classico	HSS 6-7	Δ
Peso	80	80	0	49	61	12	104	90	-14
Statura	1727	1692 - 1741	-10	1492	1460 - 1539	8	1840	1792 - 1891	2
Altezza Occhio	1618	1610	-8	1394	1406	12	1727	1724	-3
Altezza cervicale	1495	1488	-7	1276	1292	16	1604	1596	-9
Altezza spalla	1431	1424	-7	1220	1236	16	1540	1531	-10
Altezza gomito	1063	1059	-4	902	921	19	1164	1142	-23
Altezza trocantere	900	902	2	762	798	36	1004	967	-37
Altezza nocca	746	743	-3	632	652	20	826	801	-26

Altezza tibiale	449	448	-1	335	377	42	548	492	-57
Profondità corpo	258	257	-1	189	253	64	336	260	-76
Larghezza spalle	395	392	-3	287	341	54	462	405	-58
Larghezza gomiti	475	473	-2	324	409	85	559	486	-74
Larghezza fianchi	352	349	-3	240	340	100	416	359	-57

Lo scostamento Δ è stato calcolato come la differenza tra il valore della relativa misura antropometrica dell’approccio HSS e quello classico; dunque, un valore positivo significa una sovrastima dell’approccio HSS.

Nonostante la differenza di 10 mm di altezza tra i manichini P50M a confronto, lo scostamento calcolato per ogni misura antropometrica è sempre molto basso, mostrando uno scarto medio tra tutte le misure antropometriche di soli 4 mm e non superando in nessun caso il centimetro. Come atteso, l’approccio percentile classico stima con grande affidabilità i valori medi di tutta la distribuzione. Infatti, stimare il P50M da tutta la distribuzione campione o limitarla alla sola classe mediale (come fatto per l’approccio HSS) non comporta differenze significative.

Invece, come anticipato, le differenze calcolate sui manichini P5F e P95M sono molto meno trascurabili. Come si nota dalla tabella, le differenze si amplificano nelle misure di larghezza e profondità del corpo, nonché nel peso. Lo scarto medio per il P5F è di 39 mm, raggiungendo i 100 mm di differenza per la misura di larghezza fianchi; mentre per il P95M lo scarto medio è di 35 mm, raggiungendo valori di differenza di 76 mm per la profondità del corpo e di 74 mm nella larghezza gomiti.

Per permettere un immediato confronto, le misure antropometriche dei manichini generati con approccio classico e HSS sono state inserite nel software HM. Tale strumento permette di rappresentare il manichino in 2D, quindi i valori

delle misure che non sono direttamente osservabili dall'interfaccia grafica (Profondità del corpo e Peso) sono stati inseriti in figura. La figura 3.6 mostra un immediato raffronto grafico tra i manichini generati con i due approcci. Data la simmetria rispetto al piano sagittale, di ogni manichino è mostrata solo una metà e ogni coppia (P5F e HSS 1-2, P50M e HSS 4, P95M e HSS 6-7) è adiacente per evidenziare le differenze antropometriche.

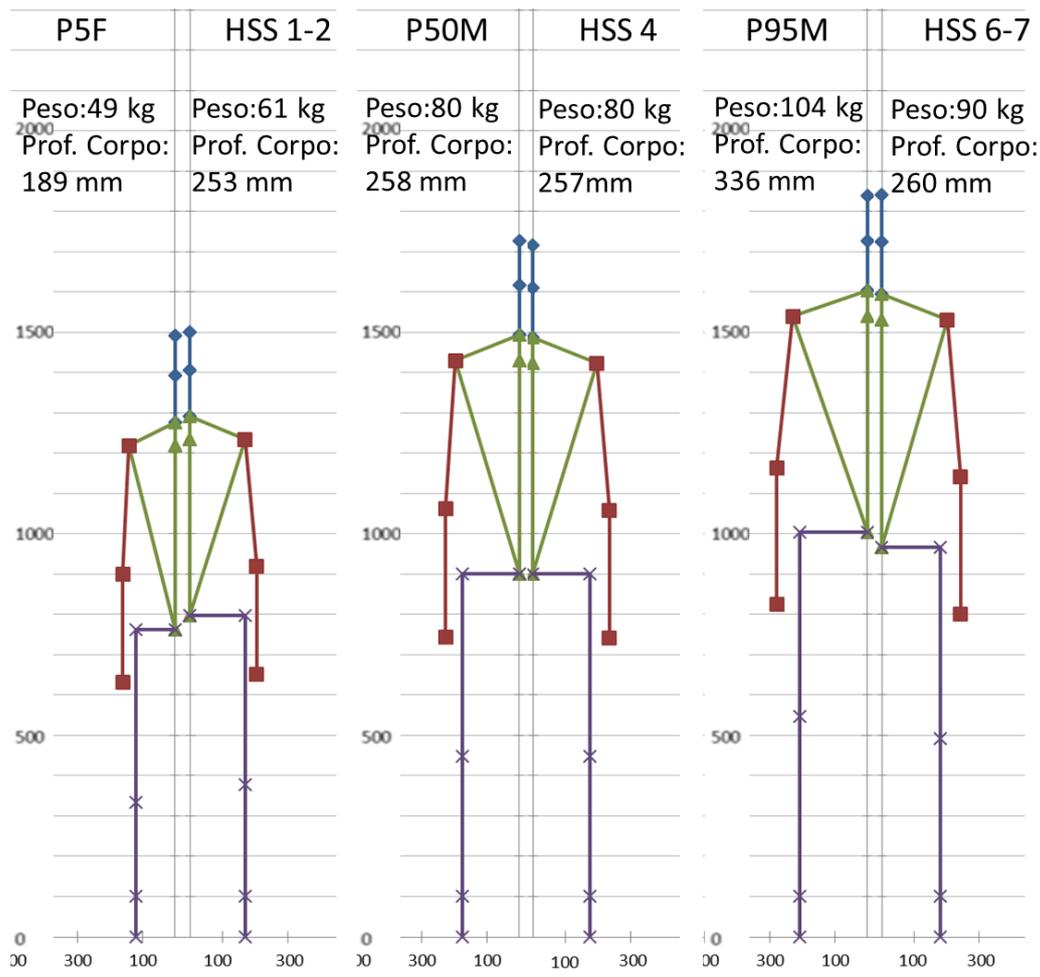


Figura 3.6: Confronto grafico tra manichini P5F/P50M/P95M ottenuti tramite approccio percentile classico e HSS1-2/HSS4/HSS6-7 ottenuti con approccio HSS. In ogni coppia a sinistra è mostrato il manichino classico e a destra il manichino HSS.

Con l'approccio percentile classico è generato un manichino con lo stesso percentile di ogni misura antropometrica. I percentili estremi rappresentano individui alti, pesanti ed ingombranti, spesso molto utili nelle verifiche di accessibilità, o individui bassi di statura, leggeri e con minori misure di larghezza e

profondità del corpo, che invece sono spesso adoperati per le verifiche di raggiungibilità dei punti di lavoro. Tuttavia, il confronto con l’approccio HSS ha messo in evidenza che i percentili estremi dei manichini classici non sono rappresentativi degli individui medi della relativa statura. Infatti, soprattutto per le misure meno correlate alla statura (come larghezze, profondità e peso), è stata rilevata una sostanziale differenza rispetto ai manichini HSS. Questi ultimi manichini rappresentativi degli individui medi di una determinata fascia di statura, sono spesso preferiti se si vogliono rappresentare individui più realistici e comuni, anziché casi limite; inoltre, la più corretta stima della massa corporea, e di conseguenza del peso di ogni singolo segmento corporeo, permette di ottenere risultati più affidabili dalle analisi biomeccaniche, ormai implementate nella maggior parte dei software commerciali per la modellazione umana virtuale.

I confronti e le considerazioni, effettuati in questo paragrafo, tra le tipologie di manichini sono riassunte anche nei grafici delle figure 3.7 – 3.8 – 3.9 per permettere un più rapido raffronto. In questi grafici sono state raggruppate le misure antropometriche con i valori più simili e la scala adattata ad esse, allo scopo di evidenziare le differenze tra i differenti approcci e percentili.

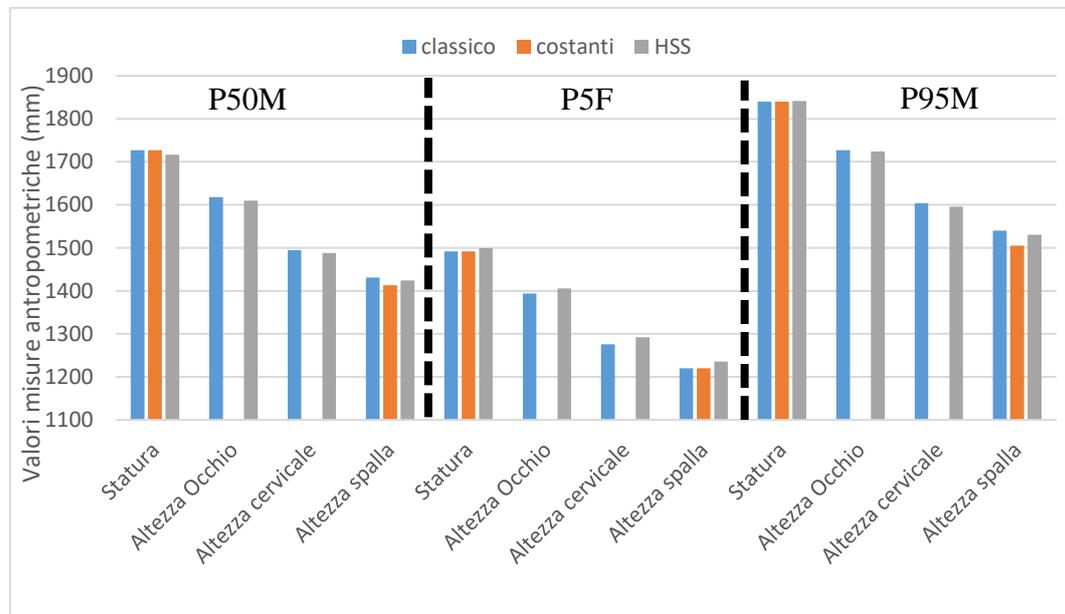


Figura 3.7: Confronto tra manichini P50M/P5F/P95M ottenuti tramite approccio percentile classico, costanti proporzionali e HSS per le misure antropometriche di Statura, Altezza cervicale, Altezza Occhio e Altezza spalla.

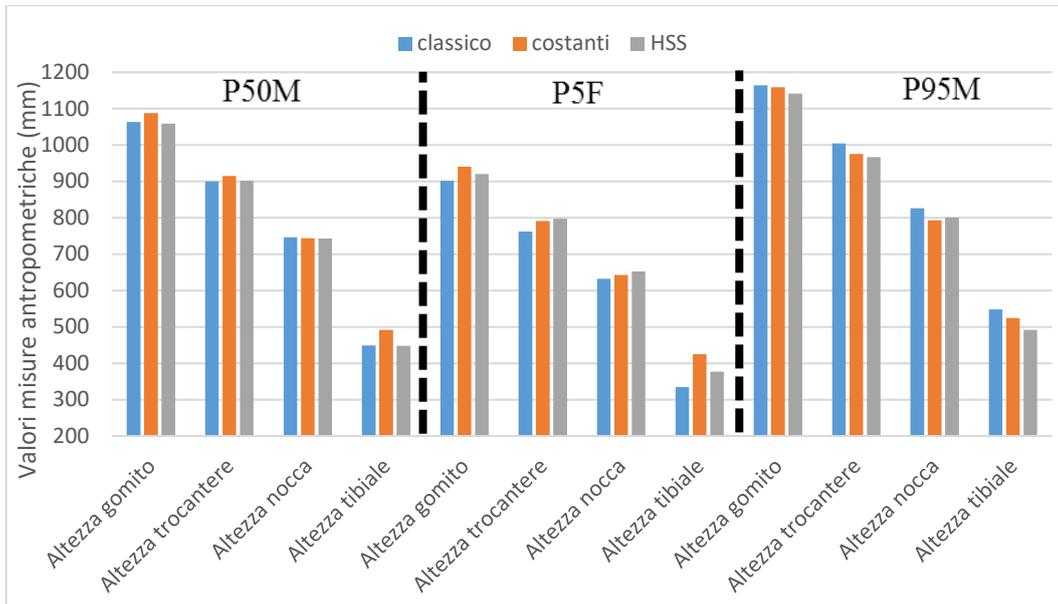


Figura 3.8: Confronto tra manichini P50M/P5F/P95M ottenuti tramite approccio percentile classico, costanti proporzionali e HSS per le misure antropometriche di Altezza gomito, Altezza trocantere, Altezza tibiale e Altezza nocca.

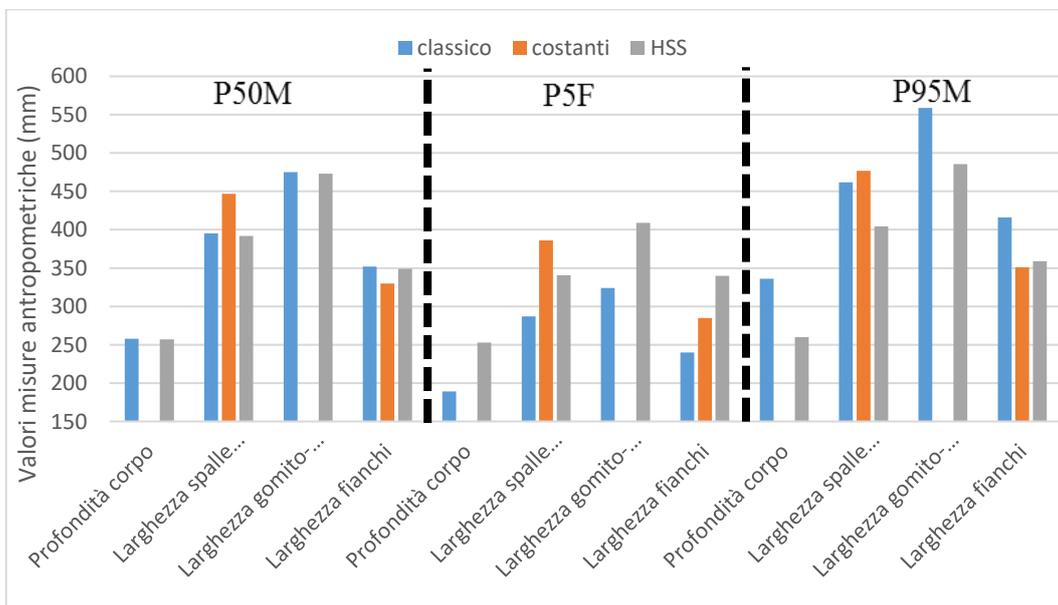


Figura 3.9: Confronto tra manichini P50M/P5F/P95M ottenuti tramite approccio percentile classico, costanti proporzionali e HSS per le misure antropometriche di Profondità corpo, Larghezza gomiti, Larghezza spalle e Larghezza fianchi.

3.3.5 Analisi multivariata con la PCA

L'analisi multivariata è stata effettuata, utilizzando la function “pca” (<https://it.mathworks.com/help/stats/pca.html>) del database di Matlab (Version R2015b) su un campione maschile parziale di 2000 soggetti. Con questa procedura è stato ridotto il set di 13 misure antropometriche ad un numero minore di variabili o componenti principali. In questo caso è stato deciso di utilizzare tre componenti (PC1, PC2 e PC3) per definire i modelli, poiché si è considerato sufficiente considerare il 90% della varianza totale del campione. Le tre componenti principali sono ortogonali tra loro e possono essere descritte approssimando un ellissoide, poi selezionato il desiderato livello di accomodamento (per esempio 95%) si può determinare lo stesso grado di inclusione dei soggetti misurati nel nuovo sistema di riferimento.

Le tre componenti principali sono state standardizzate a valori z, così è stato possibile considerare un unico valore di raggio ($r = 2.99$) come criterio di inclusione del 95%. Dopo che il criterio di inclusione è stato determinato, il passo successivo è stato identificare i modelli antropometrici sulla superficie dell'ellissoide. In accordo con precedenti studi di analisi antropometrica multivariata, i punti scelti dell'ellissoide sono i 6 punti in cui gli assi delle componenti principali intercettano l'ellissoide e 8 punti posizionati al centro di ognuno degli ottanti della superficie dell'ellissoide (figura 3.4). Questi 14 punti, in aggiunta al centro dell'ellissoide, sono stati scelti come base per i modelli antropometrici.

Il passo finale è stato calcolare le misure antropometriche di questi 15 modelli trasformando linearmente le coordinate dei punti nel sistema di riferimento delle componenti principali facendo uso della matrice ridotta degli autovalori ed autovettori.

Tabella 3.8: Manichini maschili ottenuti tramite l'analisi multivariata con le componenti principali (i valori di tutte le misure antropometriche sono espressi in mm, tranne il Peso in Kg).

Misura antropometrica	O	PC1(-)	PC1(+)	PC2(-)	PC2(+)	PC3(-)	PC3(+)
Statura	1725	1490	1961	1740	1710	1763	1687

Altezza Occhio	1616	1396	1837	1631	1602	1647	1586
Altezza cervicale	1494	1290	1698	1509	1479	1518	1470
Altezza spalla	1431	1236	1626	1439	1423	1426	1436
Altezza gomito	1064	918	1209	1090	1038	1034	1093
Altezza trocantere	906	782	1029	935	876	860	951
Altezza nocca	748	646	850	754	741	712	783
Altezza tibiale	453	391	515	451	455	330	576
Profondità corpo	266	230	303	155	377	261	272
Larghezza spalle (biacromiale)	388	335	441	355	421	437	339
Larghezza gomito-gomito	475	410	540	340	610	473	477
Larghezza fianchi	350	302	398	256	444	334	366
Peso	81	70	92	61	101	81	81

La tabella 3.8 mostra 7 modelli antropometrici, ottenuti per il centro dell'ellissoide (O) e per i 6 punti in cui l'ellissoide di inclusione intercetta i tre assi delle componenti principali. Essendo l'ellissoide centrato nell'origine del sistema di riferimento delle componenti principali, il segno relativo alla coordinata della PC identifica univocamente il punto associato al modello antropometrico.

Ogni componente principale è ottenuta come combinazione lineare di tutte le variabili del campione, tuttavia il peso che ciascuna variabile ha sulle tre componenti principali è diverso. Infatti, dalle variazioni dei valori dei modelli antropometrici rispetto al modello O (rappresentativo dell'individuo medio in tutte le dimensioni del corpo) della tabella, si può capire quali variabili influenzano maggiormente ogni componente principale.

Nello specifico, la PC1 è influenzata maggiormente dalle misure più correlate alla statura (le misure delle altezze), mentre le larghezze e la profondità del corpo variano meno sensibilmente. Dunque, PC1(+) rappresenta un individuo particolarmente alto e con le restanti misure antropometriche delle altezze proporzionate per un individuo di quella statura, mentre PC1(-) identifica un individuo basso e con le altezze proporzionate alla relativa statura. Le larghezze e la profondità essendo poco correlate con la statura restano pressoché costanti tra i due individui (alto e basso in statura).

La PC2 è particolarmente influenzata dalle misure di larghezza, profondità e peso che hanno mostrato una reciproca correlazione. Quindi, PC2(+) rappresenta un individuo con una statura vicina alla media ma con larghezze, profondità e peso elevate, mentre in PC2(-) sono molto minori, nonostante le altezze restano simili ai valori medi.

Infine, la PC3 è influenzata maggiormente dalle misure antropometriche relative alle lunghezze degli arti superiori ed inferiori. Può essere interpretata come la variabilità tra le proporzioni del corpo che identifica i somatotipi brevilinei e longilinei. Ad esempio, PC3(-) presenta una statura leggermente superiore all'individuo medio, ma le altezze dei punti antropometrici relativi all'arto superiore sono minori (braccia lunghe), mentre l'altezza trocantere identificativa dell'arto inferiore è minore (gambe corte); viceversa, PC3(+) nonostante la statura minore della media, presenta altezze maggiori dei punti antropometrici del braccio (braccia corte), ed è maggiore l'altezza trocantere identificativa dell'arto inferiore (gambe lunghe).

I restanti modelli antropometrici generati dagli 8 punti posizionati al centro di ognuno degli ottanti della superficie dell'ellissoide, rappresentano delle combinazioni tra le coordinate delle tre componenti principali.

In generale, con la PCA ogni persona misurata è identificata da un punto nel sistema di riferimento delle componenti principali. Il centro è identificativo dell'uomo medio, ovvero la persona che presenta le misure antropometriche medie del campione analizzato. I punti più vicini al centro del sistema di riferimento rappresentano le persone con le misure antropometriche più comuni e quindi vicine ai valori medi; mentre i punti più lontani sono le persone con le misure antropometriche (e le proporzioni tra esse) meno comuni e più lontane dalle medie. Su questo principio si basa il criterio di accomodamento scelto, con cui è stato generato un contorno ellissoidale che include il 95% dei punti. Progettando le postazioni di lavoro per i modelli antropometrici limite che sono stati scelti sull'ellissoide (casi meno comuni), le persone rappresentate dai punti inclusi saranno, in questo modo, accomodate.

Allo scopo di evidenziare le caratteristiche dei manichini ottenuti con l'approccio multivariato, sono stati effettuati dei confronti con manichini ottenuti con l'approccio percentile classico. Per questo confronto, sono stati generati i manichini con approccio percentile classico con una statura confrontabile a quelli multivariati. Inoltre, sono stati calcolati gli scostamenti Δ come differenza tra i manichini multivariati e quelli classici; dunque, un valore positivo significa una sovrastima dell'approccio multivariato con PCA.

La tabella 3.9 mostra il confronto tra i manichini PC1 (-) e PC1 (+), rappresentativi dell'uomo molto basso e molto alto, con i manichini P1M e P99M, anche se le differenze tra le stature non sono trascurabili. Dato che il confronto non è tra manichini di pari statura, gli scostamenti si mostrano alti anche per le altezze, ma le proporzioni corporee si mantengono circa costanti dalla statura all'altezza spalla, mentre le altezze minori mostrano uno scostamento meno coerente (ad esempio l'altezza trocantere è maggiore nel PC1 (-) di 10 mm rispetto al P1M, nonostante abbia una statura minore; mentre l'altezza trocantere è minore nel PC1(+) di 21 mm rispetto al P99M, nonostante abbia una statura maggiore) che è attribuibile alla minore correlazione tra le misure. L'aspetto più significativo è che i manichini PC1 non sono influenzati dal peso e dalle misure di larghezza e profondità del corpo. Infatti, i valori di queste misure sono molto più vicini alle medie rispetto ai manichini ottenuti con un approccio percentile classico. Dunque, i manichini PC1 rappresentano persone particolarmente alte e basse, ma con peso e

misure di larghezza e profondità nella media. Le stesse considerazioni possono essere fatte con un raffronto grafico, osservando i manichini generati con il software HM (Figura 3.10).

Tabella 3.9: Confronto tra manichini (PC1) ottenuti tramite approccio multivariato con PCA e approccio percentile classico (i valori di tutte le misure antropometriche sono espressi in mm, tranne il Peso in kg). Lo scostamento è calcolato come Δ : = (PCA - Classico).

Misura antropometrica	PC1(-)		Δ	PC1(+)		Δ
	PCA	Classico		PCA	Classico	
Peso	70	56	14	92	120	-28
Statura	1490	1552	-62	1961	1895	66
Altezza Occhio	1396	1448	-52	1837	1785	52
Altezza cervicale	1290	1333	-43	1698	1652	46
Altezza spalla	1236	1274	-38	1626	1595	31
Altezza gomito	918	933	-15	1209	1213	-4
Altezza trocantere	782	772	10	1029	1050	-21
Altezza nocca	646	640	6	850	855	-5

Altezza tibiale	391	332	59	515	589	-74
Profondità corpo	230	155	75	303	367	-64
Larghezza spalle	335	291	44	441	493	-52
Larghezza gomiti	410	347	63	540	573	-33
Larghezza fianchi	302	252	50	398	444	-46

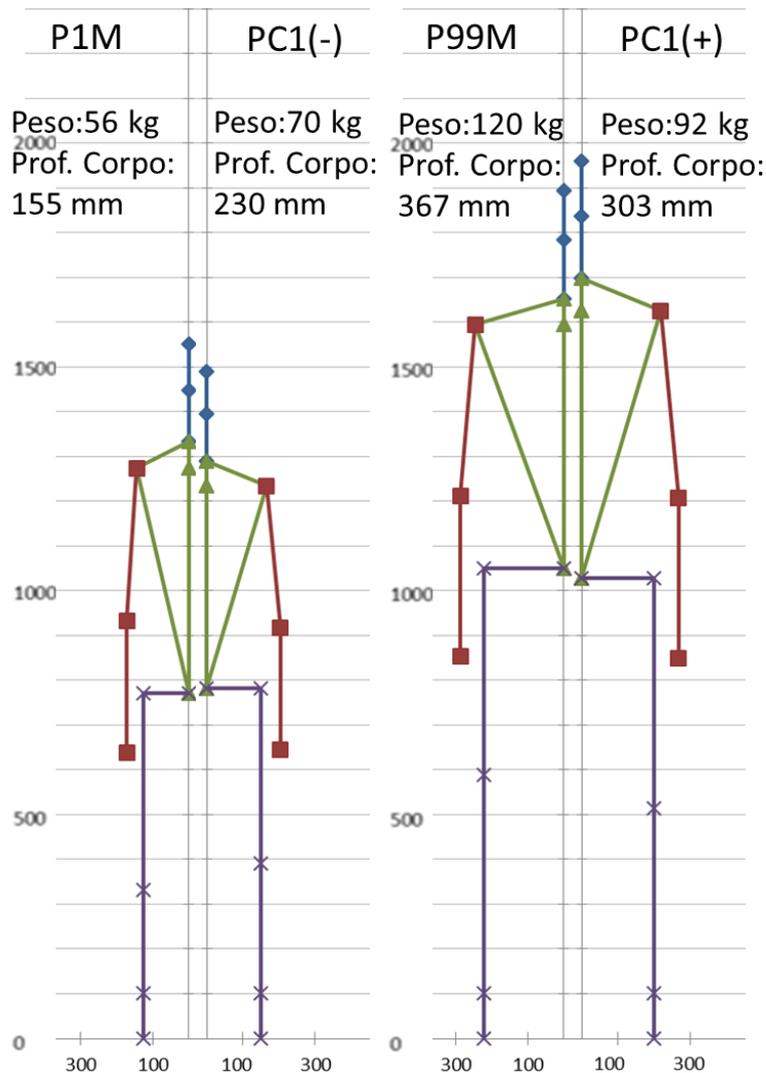


Figura 3.10: Confronto grafico tra manichini generati con approccio percentile classico e approccio HSS.

La tabella 3.10 mostra il confronto tra i manichini PC2 (-) e PC2 (+), rappresentativi dell'uomo leggero con misure di larghezza e profondità del corpo minori e dell'uomo pesante con misure di larghezza e profondità del corpo maggiori con i manichini P58M e P40M con approccio classico della stessa statura. Dall'analisi degli scostamenti, le differenze tra le misure delle altezze sono trascurabili, dato che i manichini PC2 sono poco influenzati da queste misure, mentre gli scostamenti delle misure di larghezza e profondità sono elevati (ad esempio il manichino PC2 (-) ha una profondità del corpo e le misure di larghezza di almeno 100 mm minore del manichino di pari statura P58M con approccio

classico e pesa 21 kg in meno; viceversa, il manichino PC2 (+) pesa 24 kg in più e presenta una profondità del corpo di 130 mm maggiore del manichino P40M di pari statura). Dunque, i manichini PC2 rappresentano persone con una statura non lontana dalla media, ma con peso e misure di larghezza e profondità del corpo molto bassi nel PC2 (-), o molto alti nel PC2 (+). Le stesse considerazioni possono essere fatte con un raffronto grafico, osservando i manichini generati con il software HM (Figura 3.11).

Tabella 3.10: Confronto tra manichini (PC2) ottenuti tramite approccio multivariato con PCA e approccio percentile classico (i valori di tutte le misure antropometriche sono espressi in mm, tranne il Peso in kg). Lo scostamento è calcolato come: $\Delta = (\text{PCA} - \text{Classico})$.

Misura antropometrica	PC2(-)			PC2(+)		
	PCA	Classico	Δ	PCA	Classico	Δ
Peso	61	82	-21	101	77	24
Statura	1740	1740	0	1710	1710	0
Altezza Occhio	1631	1631	0	1602	1600	2
Altezza cervicale	1509	1508	1	1479	1480	-1
Altezza spalla	1439	1444	-5	1423	1415	8
Altezza gomito	1090	1074	16	1038	1049	-11
Altezza trocantere	935	915	20	876	886	-10

Altezza nocca	754	755	-1	741	735	6
Altezza tibiale	451	460	-9	455	436	19
Profondità corpo	155	267	-112	377	247	130
Larghezza spalle	355	405	-50	421	382	39
Larghezza gomiti	340	484	-144	610	462	148
Larghezza fianchi	256	360	-104	444	341	103

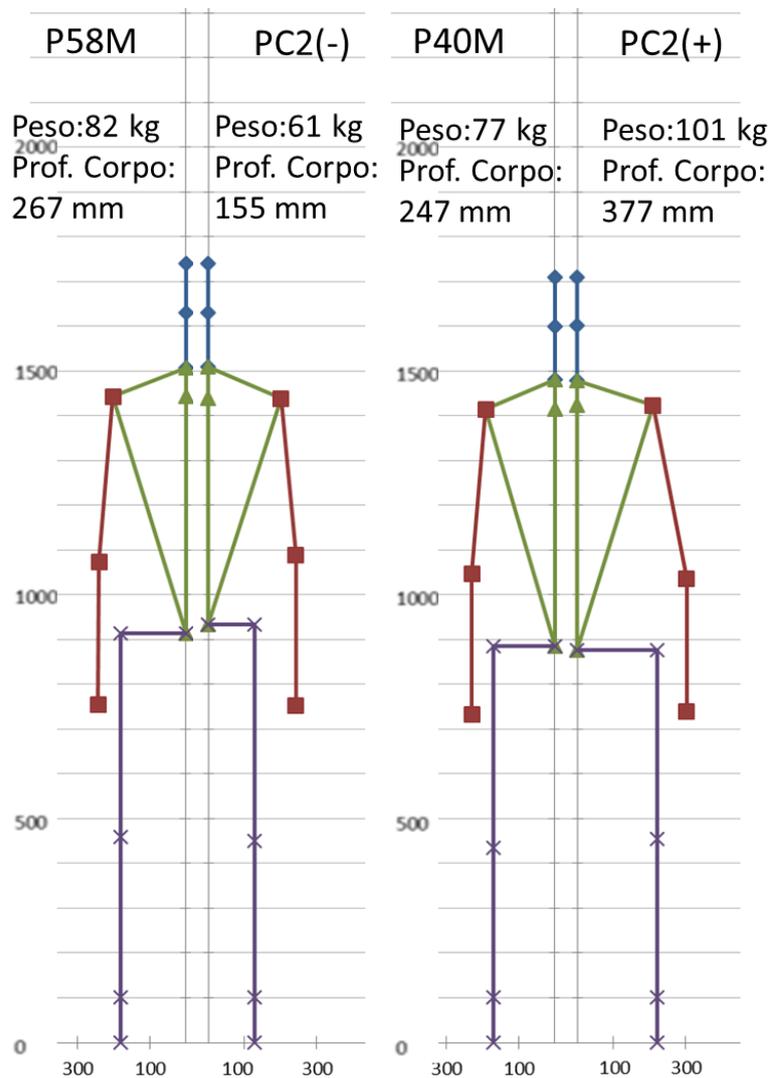


Figura 3.11: Confronto grafico tra manichini generati con approccio percentile classico e approccio HSS.

La tabella 3.11 mostra il confronto tra i manichini ottenuti con la PCA rappresentativi di uomini con statura, peso, larghezze e profondità medie, ma con diverse combinazioni di lunghezze degli arti superiori e inferiori. I manichini PC3 (-) e PC3 (+) sono stati confrontati con i manichini di pari statura ottenuti con approccio percentile classico, rispettivamente P71M e P29M. Dall'analisi degli scostamenti, le differenze tra le misure della statura, peso, misure di larghezza e profondità sono trascurabili, dato che i manichini PC3 sono poco influenzati da queste misure, mentre gli scostamenti tra le misure di altezze dei punti antropometrici relativi agli arti superiori e inferiori sono elevati (ad esempio il

manichino PC3 (-) presenta le altezze gomito e nocca di circa 60 mm inferiori rispetto al manichino di pari statura P71M con approccio classico, mentre presenta un'altezza trocantere di circa 80 mm minore; viceversa, il manichino PC3 (+) presenta le altezze gomito, nocca e trocantere maggiori rispetto al manichino P29M di pari statura). Dunque, i manichini PC3 rappresentano persone con diverse combinazioni di lunghezza degli arti superiori e inferiori, ma con peso e misure di larghezza e profondità del corpo medie per individui di quella statura. Nello specifico, il PC3 (-) presenta braccia più lunghe e gambe più corte della media, mentre il PC3 (+) individua un manichino con braccia più corte e gambe più lunghe della media. Le stesse considerazioni possono essere fatte con un raffronto grafico, osservando i manichini generati con il software HM (Figura 3.12).

Tabella 3.11: Confronto tra manichini (PC3) ottenuti tramite approccio multivariato con PCA e approccio percentile classico (i valori di tutte le misure antropometriche sono espressi in mm, tranne il Peso in kg). Lo scostamento è calcolato come: $\Delta = (\text{PCA} - \text{Classico})$

Misura antropometrica	PC3(-)		Δ	PC3(+)		Δ
	PCA	Classico		PCA	Classico	
Peso	81	86	-5	81	73	8
Statura	1763	1763	0	1687	1688	-1
Altezza Occhio	1647	1654	-7	1586	1580	6
Altezza cervicale	1518	1536	-18	1470	1459	11
Altezza spalla	1426	1467	-41	1436	1396	40

Altezza gomito	1034	1094	-60	1093	1030	63
Altezza trocantere	860	939	-79	951	870	81
Altezza nocca	712	771	-59	783	723	60
Altezza tibiale	330	478	-148	576	420	156
Profondità corpo	261	282	-21	272	234	38
Larghezza spalle	437	419	18	339	366	-27
Larghezza gomiti	473	502	-29	477	446	31
Larghezza fianchi	334	374	-40	366	327	39

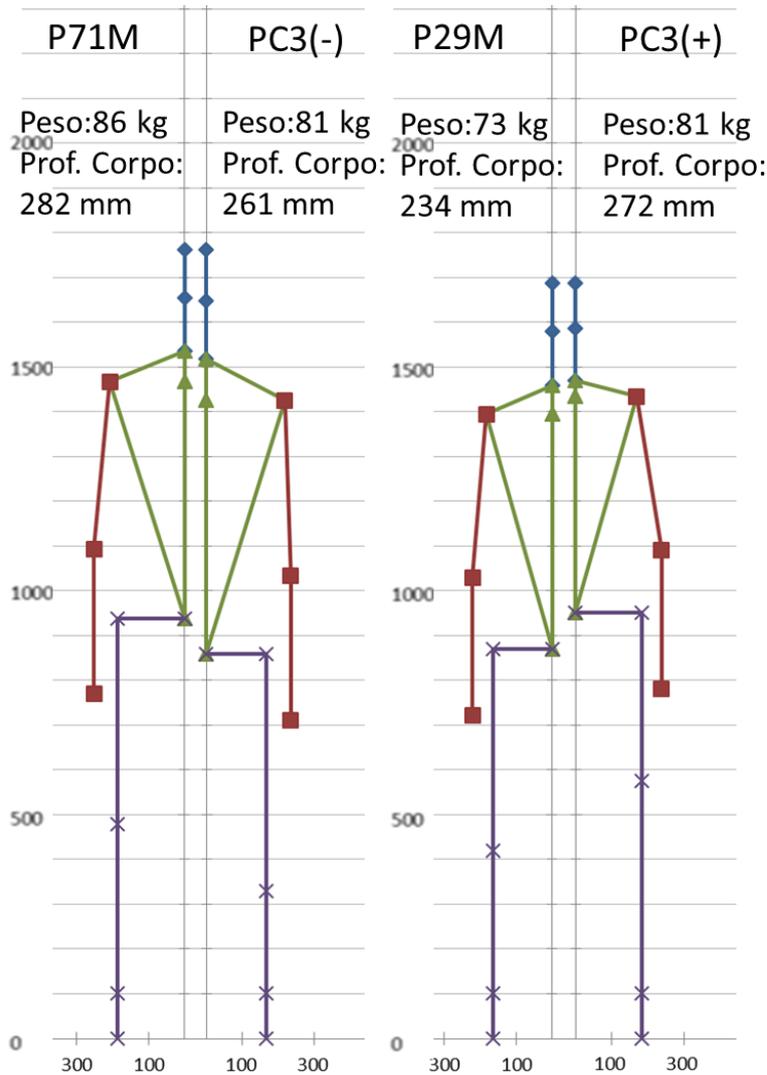


Figura 3.12: Confronto grafico tra manichini generati con approccio percentile classico e approccio HSS.

L'uso dell'approccio percentile classico porta a una diminuzione della percentuale di accomodamento, quando il problema è multivariato (ossia due o più misure antropometriche sono coinvolte nella progettazione). Il 5° ed il 95° percentile escluderebbero il 10% della popolazione sulla prima dimensione. Ad ogni altra misura da considerare, la percentuale delle persone escluse aumenta, con la conseguente diminuzione della percentuale accomodata. L'analisi multivariata invece, con le PC usate per approssimare la distribuzione ellissoidale (combinazione lineare di tutte le altre variabili), permette di considerare l'effettivo 95% della popolazione. Inoltre, i modelli antropometrici così generati non risentono

del problema di dover assemblare il modello sommando tutte le misure antropometriche dello stesso percentile, risultando incoerente matematicamente e anatomicamente. Infine, l'approccio con modellazione multivariata permette di considerare non solo la varianza di una singola dimensione antropometrica, ma di considerare la variabilità tra le dimensioni del corpo.

L'analisi presentata in questo paragrafo è stata effettuata soprattutto allo scopo di illustrare una metodologia per ottenere manichini virtuali multivariati. Infatti, è stata realizzata su un campione di 2000 soggetti, inserendo tutte le misure antropometriche rilevate nel corso del progetto: "La Fabbrica si Misura", così da ottenere dei modelli antropometrici "generalisti". Nello specifico, la banca dati è soprattutto incentrata sulle misure di altezze e lunghezze corporee, perciò incrementando le misure di larghezza e profondità del corpo si potrebbero generare diverse combinazioni lineari delle componenti principali, e di conseguenza diversi manichini. Inoltre, l'analisi con la PCA potrebbe avere un valore aggiuntivo, mirando la generazione dei modelli antropometrici a seconda della postazione di lavoro; ovvero, scegliendo le misure antropometriche analizzate con la PCA a seconda delle dimensioni più influenti nella specifica operazione da svolgere sulla postazione di lavoro.

Conclusioni generali

In linea con i principi dell'industria 4.0, l'ergonomia è da considerarsi un aspetto fondamentale già nella fase di progettazione, rendendo la progettazione stessa “human-centred”. Infatti, promuovere l'ergonomia proattiva, non limitandosi a farne un uso correttivo, permette di ottimizzare il progetto nonché ridurre i tempi ed i costi delle modifiche proposte al prodotto o al processo.

Nella fase iniziale di progettazione delle postazioni di lavoro le informazioni relative al processo produttivo sono limitate, è quindi di fondamentale importanza affidarsi al digital manufacturing, attraverso cui è possibile progettare in ambiente virtuale la linea produttiva. Il DHM, unito allo strumento della simulazione, diventa cruciale per l'individuazione di criticità, riducendo tempi e costi per eventuali interventi di modifica al progetto.

In questa fase è già possibile effettuare una distinzione tra due livelli di progettazione. Un primo livello consiste nell'utilizzo di strumenti DHM semplici e con modelli semplificati (spesso in 2D) che permettono di assistere un ergonomo ad indirizzare la progettazione. Il un secondo livello è possibile utilizzare strumenti più complessi che permettono di inserire il modello umano in 3D all'interno del modello virtuale del processo produttivo. Questi strumenti, con l'aiuto della realtà aumentata, permettono di interconnettere il mondo reale con il modello virtuale e di legare i fondamenti dell'industria 4.0 con quelli dell'ergonomia. Inoltre, l'acquisizione di informazioni dalla modellazione virtuale, correlate alle informazioni ottenibili dal mondo reale attraverso i sensori, permette l'elaborazione di una notevole quantità di dati che si traduce in un miglioramento continuo del prodotto o del processo.

In questa tesi, sono stati descritti tre lavori incentrati sull'utilizzo di software DHM. Le tre applicazioni hanno finalità differenti, ma trattano una tematica comune che è lo studio della simulazione posturale in prove di raggiungibilità con diverse antropometrie. Innanzitutto, è stato dimostrato che utilizzando due software

con un diverso grado di complessità del modello antropometrico e cinematico (HM e 3DSSPP) si possono raggiungere risultati confrontabili. Il software HM ha un numero di gradi di libertà limitato e la cinematica inversa vincolata nel piano sagittale, ma ha il vantaggio di essere un semplice e rapido strumento che può essere utilizzato come un foglio di calcolo Excel, e può essere usato anche da ergonomi senza particolari esperienze con la modellazione umana virtuale. Il manichino virtuale del 3DSSPP è, invece, un avanzato modello biomeccanico, che permette di calcolare tutte le forze e i momenti applicati in ogni giunto del modello; inoltre, il 3DSSPP possiede un numero di gradi di libertà più alto e basa il modulo di previsione della postura su una banca dati posturale ottenuta da prove sperimentali di test di raggiungibilità, per questi motivi è stato usato come riferimento. Il confronto, in termini di angoli posturali e di analisi biomeccaniche, ha permesso di validare uno strumento più semplice nel modello, ma che permette di fornire indicazioni utili ed affidabili per indirizzare la progettazione in tempi più brevi. Con questo strumento, è stata studiata l'influenza delle diverse antropometrie nelle analisi posturali delle postazioni di lavoro coerentemente con quanto specificato nelle norme tecniche di riferimento (ISO 11226, ISO 1005-4), evidenziando l'importanza di verificare le posture dei percentili limite per assicurare un confort posturale soddisfacente all'intero intervallo della popolazione per cui si sta progettando. I risultati hanno evidenziato che il percentile identificato come caso limite varia a seconda del punto di lavoro e della postura da assumere. Infine, sono stati utilizzati i risultati di questi studi, per generare mappe di confort posturale degli angoli di interesse durante prove di raggiungibilità. Le mappe posturali sono state colorate con uno schema a fasce semaforico per definire le diverse zone di confort posturale come indicato dalle normative tecniche internazionali, così da rendere le mappature un supporto affidabile e facilmente consultabile da un ergonome. Tali mappe, generalizzate in un piano di raggiungibilità normalizzato rispetto a due misure antropometriche caratteristiche (statura e lunghezza del braccio), sono risultate utilizzabili a prescindere dall'antropometria dell'operatore.

Le diverse applicazioni con i DHM hanno evidenziato l'importanza del modello antropometrico alla base degli strumenti utilizzati. Per aggiornare tali modelli, a causa della mancanza di una banca dati antropometrica rappresentativa della popolazione lavorativa italiana, è stata effettuata un'indagine antropometrica, scegliendo come campione gli operai degli stabilimenti produttivi di FCA. Sono state descritte le modalità seguite per la rilevazione delle misure antropometriche, dopodiché la banca dati è stata analizzata statisticamente allo scopo di stimare i modelli antropometrici dei percentili a cui si riferisce la progettazione ed

evidenziare differenze antropometriche significative dovute all'età e all'area geografica del campione. Infine, sono stati generati, con diversi approcci, i modelli dei manichini virtuali dai dati antropometrici rilevati. I diversi modelli ottenuti, sono stati confrontati tra loro e discussi per guidare un progettista alla scelta del modello antropometrico più adatto alle sue particolari applicazioni.

I risultati di questa tesi hanno permesso di fornire degli strumenti per assistere un ergonomo nella verifica e nella progettazione delle postazioni di lavoro, nel rispetto dei principi dell'ergonomia. Gli strumenti forniti e validati dai risultati degli studi con i DHM sono applicativi pratici che possono essere usati da un ergonomo per fornire un supporto in fase di progettazione delle postazioni di lavoro. Inoltre, in questa tesi sono forniti dei modelli antropometrici basati su una banca dati affidabile ed aggiornata della popolazione lavorativa italiana. I modelli possono essere utilizzati come riferimento per applicazioni di progettazione oppure implementati come manichini virtuali nei software DHM.

Nel presente lavoro di tesi è stata fornita una prima analisi di confronto dei manichini antropometrici in termini di differenze tra le dimensioni corporee. Il prossimo passo richiederà l'implementazione di tali modelli nei software DHM e la validazione dei risultati della simulazione su diversi casi studio. In particolare, occorrerà verificare l'impatto dei manichini HSS e dei manichini multivariati rispetto ad aspetti quali la raggiungibilità, l'accessibilità dello spazio di lavoro, gli indici ergonomici e di confort e la valutazione del carico biomeccanico. I manichini multivariati, creati tramite l'utilizzo della PCA, verranno estesi al genere femminile, non presentato in questo studio. Un ulteriore sviluppo potrebbe riguardare la generazione di modelli antropometrici multivariati specifici per tipologie di postazioni di lavoro, indirizzando l'analisi PCA sulle misure antropometriche più rilevanti all'accomodamento della popolazione lavorativa nella specifica postazione.

Appendice

Misure antropometriche

In questa appendice saranno illustrate le specifiche seguite per una corretta rilevazione delle misure antropometriche scelte per il progetto: “La Fabbrica si Misura”. Laddove possibile, saranno fornite definizioni e immagini direttamente prelevate dalla normativa di riferimento ISO 7250: Misurazioni di base del corpo umano per la progettazione tecnologica, mentre per le misurazioni mancanti saranno fornite le relative fonti. Infatti, come recita la normativa stessa: “La presente norma internazionale può essere usata in combinazione con regolamenti o accordi nazionali o internazionali al fine di garantire una definizione armonica dei gruppi di popolazione. Nelle sue varie applicazioni l'elenco può essere integrato da specifiche misure aggiuntive”.

Prima di procedere con la descrizione delle misure antropometriche, saranno fornite alcune definizioni:

- Piano di Francoforte: piano orizzontale normalizzato a livello del bordo superiore dell'apertura esterna del meato uditivo (apertura dell'orecchio esterno) e del punto più basso del margine orbitale (estremità inferiore della cavità oculare) mantenendo verticale il piano sagittale del capo.
- Sagittale: relativo al piano medio antero-posteriore (dal davanti verso dietro) del corpo (mediosagittale) o a un piano parallelo al piano mediale (parasagittale).

Peso

Codice ISO 7250-1: 4.1.1

Descrizione: massa totale del corpo.

Metodo: il soggetto sta eretto su una bilancia

Strumento: bilancia medica

Statura

Codice ISO 7250-1: 4.1.2

Descrizione: distanza verticale dal pavimento al punto più alto del capo Vertex (punto più alto del capo nel piano medio sagittale). Vedere figura A1.

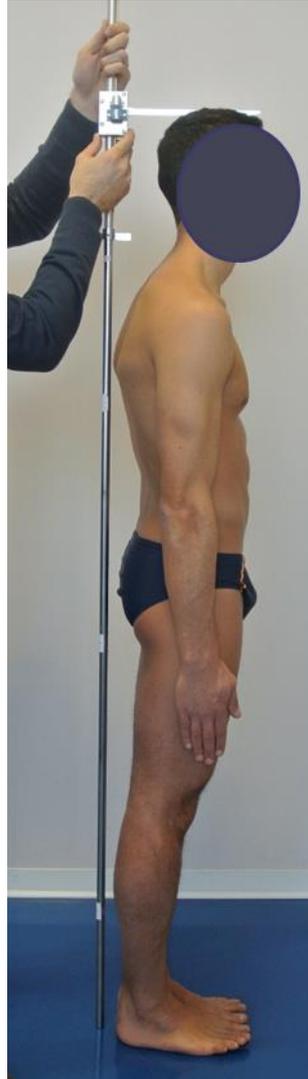


Figura A1: Misurazione della statura

Metodo: il soggetto sta completamente eretto con i piedi uniti. Il capo è orientato nel piano di Francoforte.

Strumento: antropometro.

Altezza occhio

Codice ISO 7250-1: 4.1.3

Descrizione: distanza verticale dal pavimento all'angolo esterno dell'occhio.
Vedere figura A2.

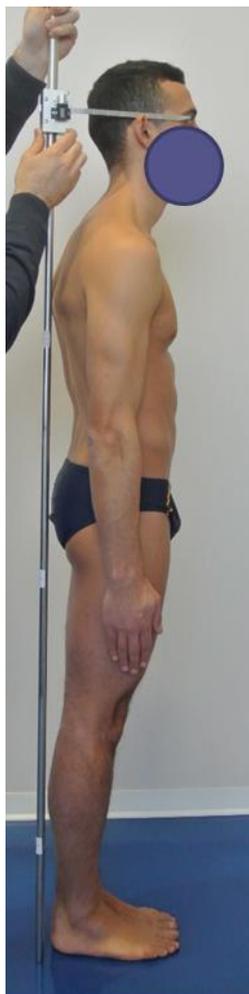


Figura A2: Misurazione dell'altezza occhio

Metodo: il soggetto sta completamente eretto con i piedi uniti. Il capo è orientato nel piano di Francoforte.

Strumento: antropometro

Altezza cervicale

Misura antropometrica non presente in ISO 7250-1. La ANSUR è stata scelta come riferimento per la misura antropometrica e la descrizione è stata resa coerente con le modalità indicate dalla normativa tecnica di riferimento.

Descrizione: distanza verticale dal pavimento alla settima vertebra cervicale. Vedere figura A3

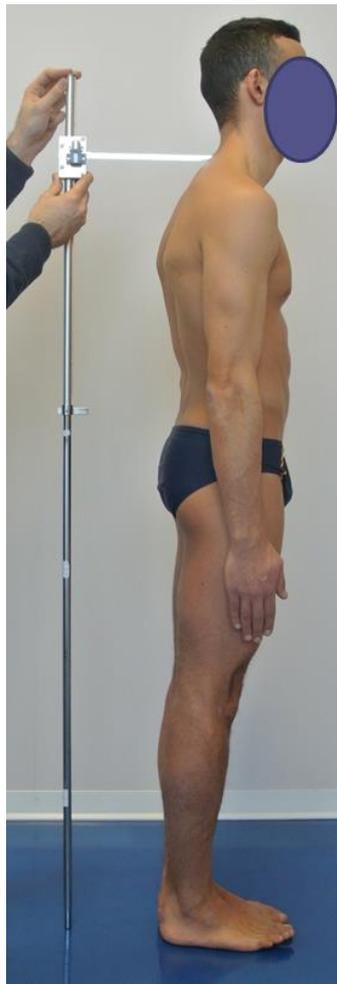


Figura A3: Misurazione dell'altezza cervicale

Metodo: il soggetto sta completamente eretto con i piedi uniti. Il capo è orientato nel piano di Francoforte.

Strumento: antropometro

Altezza spalla

Codice ISO 7250-1: 4.1.4

Descrizione: distanza verticale dal pavimento all'acromion (punto più laterale del margine della spina della scapola). Vedere figura A4.

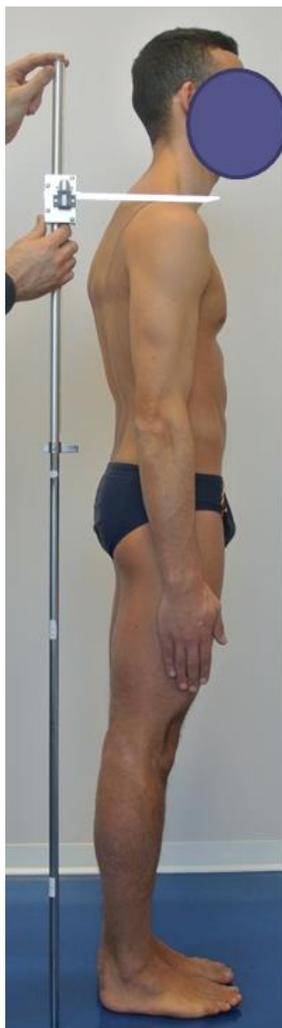


Figura A4: Misurazione dell'altezza spalla

Metodo: il soggetto sta completamente eretto con i piedi uniti. Le spalle sono rilassate e le braccia liberamente pendenti.

Strumento: antropometro

Altezza gomito

Codice ISO 7250-1: 4.1.5

Descrizione: distanza verticale dal pavimento al punto più basso del gomito piegato. Vedere figura A5.



Figura A5: Misurazione dell'altezza gomito

Metodo: il soggetto sta completamente eretto con i piedi uniti. Il braccio è liberamente pendente e l'avambraccio flesso ad angolo retto rispetto ad esso.

Strumento: antropometro

Altezza trocantere

Misura antropometrica non presente in ISO 7250-1. La ANSUR è stata scelta come riferimento per la misura antropometrica e la descrizione è stata resa coerente con le modalità indicate dalla normativa tecnica di riferimento.

Descrizione: distanza verticale dal pavimento al trocantere (punto superiore sulla proiezione laterale del grande trocantere). Vedere figura A6.



Figura A6: Misurazione dell'altezza trocantere

Metodo: il soggetto sta completamente eretto con i piedi uniti.

Strumento: antropometro

Altezza nocca

Misura antropometrica non presente in ISO 7250-1. La ANSUR è stata scelta come riferimento per la misura antropometrica e la descrizione è stata resa coerente con le modalità indicate dalla normativa tecnica di riferimento.

Descrizione: distanza verticale dal pavimento al terzo metacarpo (nel punto di giunzione tra il medio ed il palmo della mano). Vedere figura A7.



Figura A7: Misurazione dell'altezza nocca

Metodo: Il soggetto è in posizione eretta con i piedi uniti, le spalle rilassate e le braccia distese.

Strumento: Antropometro

Altezza tibiale

Codice ISO 7250-1: 4.1.8

Descrizione: distanza verticale dal pavimento al punto tibiale (punto del margine medio superiore interno dell'estremità prossimale della tibia). Vedere figura A8.



Figura A8: Misurazione dell'altezza tibiale

Metodo: il soggetto sta completamente eretto con i piedi uniti.

Strumento: antropometro

Profondità corpo

Codice ISO 7250-1: 4.1.10

Descrizione: profondità massima del corpo. Vedere figura A9.



Figura A9: Misurazione della profondità corpo

Metodo: il soggetto sta eretto contro la parete, con i piedi uniti e le braccia liberamente pendenti.

Strumento: antropometro

Larghezza spalle (biacromiale)

Codice ISO 7250-1: 4.2.8

Descrizione: distanza orizzontale tra i punti acromion bilaterali. Vedere figura A10.

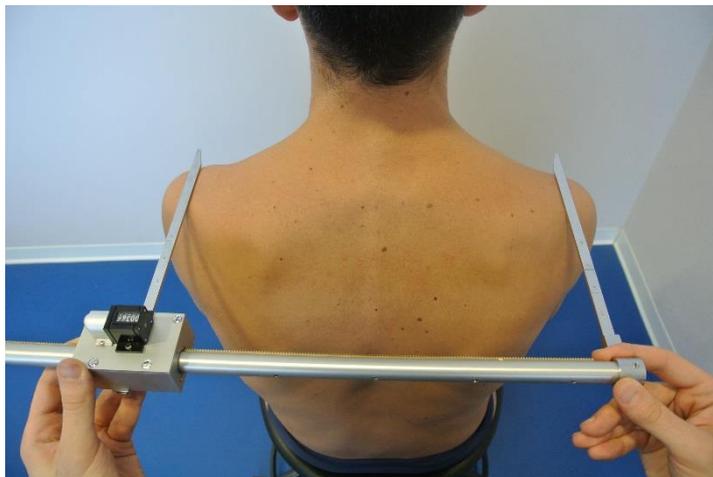


Figura A10: Misurazione della larghezza spalle

Metodo: il soggetto è seduto o in posizione completamente eretta con le spalle rilassate.

Strumento: calibro scorrevole o compasso a spessore

Larghezza gomito-gomito

Codice ISO 7250-1: 4.2.10

Descrizione: massima distanza orizzontale tra le superfici laterali della regione dei gomiti. Vedere figura A11.

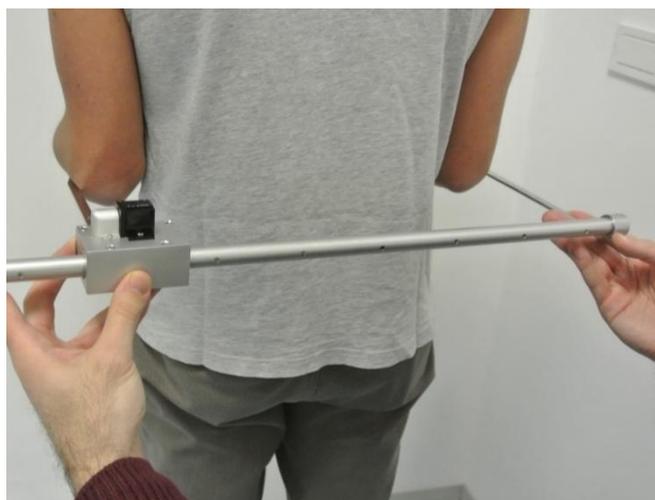


Figura A11: Misurazione della larghezza gomito-gomito

Metodo: il soggetto è seduto o in posizione eretta con le braccia pendenti che toccano leggermente i lati del corpo. Gli avambracci sono estesi orizzontalmente paralleli tra di loro e rispetto al pavimento. La misurazione è presa senza premere sui gomiti.

Strumento: calibro scorrevole o compasso a spessore

Larghezza fianchi

Codice ISO 7250-1: 4.2.11

Descrizione: larghezza del corpo misurata lunga la parte più ampia dei fianchi. Vedere figura A12.



Figura A12: Misurazione della larghezza fianchi

Metodo: il soggetto è seduto con le cosce completamente sostenute e le gambe liberamente pendenti, con le ginocchia unite. La misurazione è presa senza premere sui fianchi.

Strumento: calibro scorrevole o compasso a spessore.

Bibliografia

- Abdel-Malek, K., Yu, W., & Jaber, M. (2001). Realistic posture prediction. *SAE Digital Human Modeling and Simulation*.
- Beck, D. J., & Chaffin, D. B. (1992). An evaluation of inverse kinematics models for posture prediction. *Computer Applications in Ergonomics, Occupational safety and health*, 329-336.
- Bernard, B. P., & Putz-Anderson, V. (1997). Musculoskeletal disorders and workplace factors; a critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back.
- Bullock, M. I. (1974). The determination of functional arm reach boundaries for operation of manual controls. *Ergonomics*, 17(3), 375-388.
- Caputo, F., Greco, A., Egidio, D. A., Notaro, I., & Spada, S. (2017). A Preventive Ergonomic Approach Based on Virtual and Immersive Reality. In *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* (pp. 3-15). Springer, Cham.
- Castellone, R., Sessa, F., Spada, S., & Cavatorta, M. P. (2017c). Comprehensive Mappings of Postural Angles on a Normalized Plane of Reachability. In *Advances in Human Factors in Simulation and Modeling: Proceedings of the AHFE 2017 Conference on Human Factors in Simulation and Modeling, July 17-21, 2017, Los Angeles, California, USA* (Vol. 591, p. 458). Springer.
- Castellone, R., Sessa, F., Spada, S., & Pia, C. M. (2016). Mappatura di angoli posturali e confronto tra strumenti di Digital Human Modeling per prove di raggiungibilità. XI Congresso Nazionale SIE 2016 - Ergonomia: sfide sociali e opportunità professionali dalla creatività alla pratica per aumentare

- l'impatto dell'ergonomia nella società, Napoli, 16-18 November, 2016, 41-45.
- Castellone, R., Spada, S., Caiazzo, G., & Cavatorta, M. P. (2017b). Assessment of Anthropometric Differences in the Design of Workstations: Case Studies of an Automotive Assembly Line. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(14), 4549-4555.
- Castellone, R., Spada, S., Sessa, F., & Cavatorta, M. P. (2017a). A Simple Multibody 2d-model for Early Postural Checks in Workplace Design. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(23), 13451-13461.
- Chaffin, D. B. (2005). Improving digital human modelling for proactive ergonomics in design. *Ergonomics*, 48(5), 478-491
- Chaffin, D. B., Andersson, G., & Martin, B. J. (1999). *Occupational biomechanics* (pp. 91-130). New York: Wiley.
- Chaffin, D. B., Andres, R. O., & Garg, A. (1983). Volitional postures during maximal push/pull exertions in the sagittal plane. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 25(5), 541-550.
- Chow, A. Y., & Dickerson, C. R. (2009). Shoulder strength of females while sitting and standing as a function of hand location and force direction. *Applied Ergonomics*, 40(3), 303-308.
- Clarke, H. H. (1966) *Muscular Strength and Endurance in Man*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 39-51.
- De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S., & O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59(5), 671-681.
- De Magistris, G., Micaelli, A., Savin, J., Gaudez, C., & Marsot, J. (2015). Dynamic digital human models for ergonomic analysis based on humanoid robotics techniques. *Int. J. Digital Human*, 1 (1), 81-109.
- De Santos, F. J. N., & Villalonga, S. G. (2015, March). Exploiting local clouds in the internet of everything environment. In *Parallel, Distributed and*

- Network-Based Processing (PDP), 2015 23rd Euromicro International Conference on (pp. 296-300). IEEE.
- De Vries, C., Garneau, C. J., Nadadur, G., & Parkinson, M. B. (2010, January). Considering secular and demographic trends in designing for present and future populations. In ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (pp. 391-398). American Society of Mechanical Engineers.
- Delangle, M., Petiot, J. F., & Poirson, E. (2016). Using motion capture to study human standing accessibility: comparison between physical experiment, static model and virtual ergonomic evaluations. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-10.
- Drillis, R., Contini, R., & Bluestein, M. (1966). *Body segment parameters*. Research Division, NY: New York University, School of Engineering and Science.
- Fromuth, R. C., & Parkinson, M. B. (2008). Predicting 5th and 95th percentile anthropometric segment lengths from population stature. In ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (pp. 581-588). American Society of Mechanical Engineers.
- Fubini E., Masali M., Pierlorenzi G., Micheletti Cremasco M., 2010. Part 2: Statistical summaries of body measurements from individual ISO populations. International Standard ISO 7250-2 Basic human body measurements for technological design, ISO Committee identification: ISO/TC 159/SC 3/WG 1. ISO copyright office, Geneva, Svizzera: pp.12-18.
- Garneau, C. J., & Parkinson, M. B. (2011). A comparison of methodologies for designing for human variability. *Journal of Engineering Design*, 22(7), 505-521.
- Giusto, D., Iera, A., Morabito, G., & Atzori, L. (Eds.). (2010). *The internet of things: 20th Tyrrhenian workshop on digital communications*. Springer Science & Business Media.

- Gopura, R. A. R. C., Bandara, D. S. V., Kiguchi, K., & Mann, G. K. (2016). Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review. *Robotics and Autonomous Systems*, 75, 203-220.
- Gordon, C. C., Blackwell, C. L., Bradtmiller, B., Parham, J. L., Barrientos, P., Paquette, S. P., ... & Mucher, M. (2014). 2012 Anthropometric Survey of US Army Personnel: Methods and Summary Statistics (No. NATICK/TR-15/007). Army natick soldier research development and engineering center ma.
- Gordon, C. C., Churchill, T., Clauser, C. E., Bradtmiller, B., McConville, J. T., Tebbetts, I., & Walker, R. A. (1989). Anthropometric survey of US Army personnel: Summary statistics, interim report for 1988. Anthropology research project inc yellow springs oh.
- Grajewski, D., Górski, F., Zawadzki, P., & Hamrol, A. (2013). Application of virtual reality techniques in design of ergonomic manufacturing workplaces. *Procedia Computer Science*, 25, 289-301.
- Guan, J., Hsiao, H., Bradtmiller, B., Kau, T. Y., Reed, M. R., Jahns, S. K., ... & Piamonte, D. P. T. (2012). US truck driver anthropometric study and multivariate anthropometric models for cab designs. *Human factors*, 54(5), 849-871.
- Harrison, C. R., & Robinette, K. M. (2002). CAESAR: Summary statistics for the adult population (ages 18-65) of the United States of America. Air force research lab wright-patterson afb oh human effectiveness directorate.
- Haslegrave, C. M. (1986). Characterizing the anthropometric extremes of the population. *Ergonomics*, 29(2), 281-301.
- Haupt, D. R., & Parkinson, M. B. (2014). Advancing design through the creation and visualization of virtual population representing US civilians. In *ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. In *System Sciences (HICSS)*, 2016 49th Hawaii International Conference on (pp. 3928-3937). IEEE.

- HFES 300 Committee (Ed.). (2004). Guidelines for using anthropometric data in product design. Human Factors and Ergonomics Society.
- Hodder, J. N., La Delfa, N. J., & Potvin, J. R. (2015). Testing the assumption in ergonomics software that overall shoulder strength can be accurately calculated by treating orthopedic axes as independent. *Journal of Electromyography and Kinesiology*.
- Holland, S. M. (2008). Principal components analysis (PCA). Department of Geology, University of Georgia, Athens, GA, 30602-2501.
- International Standard ISO 11226:2000. Ergonomics – Evaluation of static working postures.
- International Standard ISO 15535:2012: General requirements for establishing anthropometric databases.
- International Standard ISO 7250-1:2008: Basic human body measurements for technological design – Part 1: Body measurement definitions and landmarks.
- International Standard ISO/TR 7250-2:2009: Basic human body measurements for technological design – Part 2: Statistical summaries of body measurements from individual ISO populations.
- Jackson, A. S., Stanforth, P. R., Gagnon, J., Rankinen, T., Leon, A. S., Rao, D. C., & Wilmore, J. H. (2002). The effect of sex, age and race on estimating percentage body fat from body mass index: The Heritage Family Study. *International journal of obesity*, 26(6), 789.
- Jain, S., Shao, G., & Shin, S. J. (2017). Manufacturing data analytics using a virtual factory representation. *International Journal of Production Research*, 55(18), 5450-5464.
- Jolliffe, I. T. (1986). Principal Component Analysis and Factor Analysis. In *Principal component analysis* (pp. 115-128). Springer New York.
- Jung, E. S., Kee, D., & Chung, M. K. (1995). Upper body reach posture prediction for ergonomic evaluation models. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 16(2), 95-107.

- Jung, K., Kwon, O., & You, H. (2009). Development of a digital human model generation method for ergonomic design in virtual environment. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(5), 744-748.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group.
- Kaya, M. D., Hasiloglu, A. S., Bayramoglu, M., Yesilyurt, H., & Ozok, A. F. (2003). A new approach to estimate anthropometric measurements by adaptive neuro-fuzzy inference system. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 32(2), 105-114.
- Khadem, M. M., & Islam, M. A. (2014). Development of anthropometric data for Bangladeshi male population. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(3), 407-412.
- Khosla, T., & Lowe, C. R. (1967). Indices of obesity derived from body weight and height. *British journal of preventive & social medicine*, 21(3), 122.
- Kinghorn, R. A., & Bittner, A. C. (1995). Truck driver anthropometric data: estimation of the current population. *International journal of industrial ergonomics*, 15(3), 199-204.
- Kumar, S., Chaffin, D. B., & Redfern, M. (1988). Isometric and isokinetic back and arm lifting strengths: device and measurement. *Journal of biomechanics*, 21(1), 35-44.
- La Delfa, N. J., & Potvin, J. R. (2016). Multidirectional manual arm strength and its relationship with resultant shoulder moment and arm posture. *Ergonomics*, 1-12.
- La Delfa, N. J., Freeman, C. C., Petruzzi, C., & Potvin, J. R. (2014). Equations to predict female manual arm strength based on hand location relative to the shoulder. *Ergonomics*, 57(2), 254-261.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239-242.

- Lawson, G., Salanitri, D., & Waterfield, B. (2016). Future directions for the development of virtual reality within an automotive manufacturer. *Applied ergonomics*, 53, 323-330.
- Lin, Y. C., Wang, M. J. J., & Wang, E. M. (2004). The comparisons of anthropometric characteristics among four peoples in East Asia. *Applied Ergonomics*, 35(2), 173-178.
- Masali M. (a cura di): *L'Italia si Misura. Vent'anni di ricerca (1990-2010). Vademecum antropometrico per il Design e l'Ergonomia. Vol II., Collana A misura d'Uomo-Antropometria ed Ergonomia Aracne Editrice S.r.l., Roma, 2013. ISBN 978-88-548-5715-5*
- McConville, J. T., & Churchill, E. (1976). *Statistical concepts in design*. Webb associates yellow springs oh.
- Mokdad, M. (2002). Anthropometric study of Algerian farmers. *International journal of industrial ergonomics*, 29(6), 331-341.
- Mourtzis, D., Doukas, M., & Bernidaki, D. (2014). Simulation in manufacturing: Review and challenges. *Procedia CIRP*, 25, 213-229.
- Nadadur, G., & Parkinson, M. B. (2008). Extrapolation of anthropometric measures to new populations. *SAE international journal of passenger cars-electronic and electrical systems*, 1(2008-01-1858), 567-573.
- National Research Council. (2001). *Musculoskeletal disorders and the workplace: low back and upper extremities*. National Academies Press.
- Parkinson, M. B., & Reed, M. P. (2007). Standing reach envelopes incorporating anthropometric variance and postural cost (No. 2007-01-2482). SAE Technical Paper.
- Parkinson, M. B., & Reed, M. P. (2010). Creating virtual user populations by analysis of anthropometric data. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40(1), 106-111.
- Peacock, B., & Karwowski, W. (Eds.). (1993). *Automotive ergonomics* (pp. 237-320). London; Washington: Taylor & Francis.
- Pentikis, J., Lopez, M. S., & Thomas, R. E. (2002). Ergonomics evaluation of a government office building. *Work*, 18(2), 123-131.

- Pheasant, S., & Haslegrave, C. M. (2016). *Bodyspace: Anthropometry, ergonomics and the design of work*. CRC Press.
- Phillips, C. B., & Badler, N. I. (1988). Jack: A toolkit for manipulating articulated figures. In *Proceedings of the 1st annual ACM SIGGRAPH symposium on User Interface Software*, 221-229, ACM.
- Poirson, E., & Delangle, M. (2013). Comparative analysis of human modeling tools. In *International Digital Human Modeling Symposium*. Ann Arbor, United States.
- Rasmussen, J., Waagepetersen, R. P., & Rasmussen, K. P. (2017). Projection of Anthropometric Correlation for Virtual Population Modelling. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation*.
- Roebuck, J. A. (1995). *Anthropometric methods: designing to fit the human body*. Human Factors and Ergonomics Society.
- Roman-Liu, D., & Tokarski, T. (2005). Upper limb strength in relation to upper limb posture. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(1), 19-31.
- Rothman, K. J. (2008). BMI-related errors in the measurement of obesity. *International journal of obesity*, 32, S56-S59.
- Ryan, P. W., Springer, W., & Hlastala, M. (1970). *Cockpit geometry evaluation*. Joint Army-Navy Aircraft Instrumentation Research Report, 700201.
- Salvendy, G. (2012). *Handbook of human factors and ergonomics*. John Wiley & Sons.
- Santos, C., Mehrsai, A., Barros, A. C., Araújo, M., & Ares, E. (2017). Towards Industry 4.0: an overview of European strategic roadmaps. *Procedia Manufacturing*, 13, 972-979.
- Seneviratne, S., Hu, Y., Nguyen, T., Lan, G., Khalifa, S., Thilakarathna, K., & Seneviratne, A. (2017). A survey of wearable devices and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4), 2573-2620.
- Sengupta, A. K., & Das, B. (2000). Maximum reach envelope for the seated and standing male and female for industrial workstation design. *Ergonomics*, 43(9), 1390-1404.

- Spada, S., Germanà, D., C., Ghibaudo, L., & Sessa, F. (2013). Applications and benefits of digital human models to improve the design of workcells in car's manufacturing plants according to international standards. *Advances in Manufacturing Technology XXVII*, 361.
- Stobbe, T. J. (1982). The development of a practical strength testing program for industry (Doctoral dissertation, University of Michigan).
- Talamo, L. (2007) *Metodi e strumenti di Digital Human Modeling e Virtual Reality per la progettazione ergonomica di una postazione di lavoro*. Dissertation.
- The University of Michigan. (2011). 3D Static Strength Predication Program, Ver. 6.0.5, User's Manual, The University of Michigan, Center for Ergonomics, Ann Arbor, Michigan.
- UNI EN 1005-4:2009. Safety of machinery – Human physical performance – Part 4: Evaluation of working postures and movements in relation to machinery.
- Vilarinho, T., Farshchian, B. A., Floch, J., & Mathisen, B. M. (2013). A communication framework for the internet of people and things based on the concept of activity feeds in social computing. In *Intelligent Environments (IE)*, 9th International Conference on (pp. 1-8). IEEE.
- Wilkinson, A. T., Pinder, A. D. J., & Grieve, D. W. (1995). Relationships between one-handed force exertions in all directions and their associated postures. *Clinical Biomechanics*, 10(1), 21-28.
- Woldstad, J.C. (2006). Digital Human Models for Ergonomics. *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*, ed. W. Karwowski, Taylor & Francis.
- World Health Organization BMI classification (http://apps.who.int/bmi/index.jsp?introPage=intro_3.html)
- Zehner, G. F., Meindl, R. S., & Hudson, J. A. (1993). A multivariate anthropometric method for crew station design. Kent state univ oh.